

〈論 文〉

단순화된 2차원 자동차형 물체주위의 유동에 관한 실험적 연구

유정열* · 김사랑** · 강신형* · 백세진*** · 이택식* · 김응서*

(1988년 10월 26일 접수)

An Experimental Study on the Flow Around a Simplified 2-Dimensional Vehicle-Like Body

J. Y. Yoo, S. R. Kim, S. H. Kang, S. J. Baik, T. S. Lee and E. S. Kim

Key Words : Two-Dimensional Vehicle-Like Body(2차원 자동차형 물체), Base Slant Angle(후부경사각), Recirculating Region(재순환영역), Separation Bubble(박리 기포), Wool-Tuft Flow Visualization Technique(울터프트 유동 가시화 기법)

Abstract

An experimental study has been performed to study the effect of the base slant angle of a 1/10 scale two-dimensional vehicle-like body on its wake flow including the recirculating region, where the simplified shape of the body has been originated from a profile of a domestic passenger car. In the case of a Reynolds number based on the length of the model $R=7.96 \times 10^5$, the surface pressure coefficient, the mean velocity and the turbulent stresses have been measured, while the flow visualization technique using wool tuft has been adopted as well. When the base slant angle of the model is 15° , the free stream flowing parallel to the slant is observed to be separated from the lower edge of the slant, thus forming the smallest recirculating region. When the base slant angles are 30° and 45° , the free streams are separated from the upper edge of the slant and the sizes of the recirculating zones are observed to be almost the same as when the base slant angle is 0° . From these observations, it is conjectured that between the base slant angles of 15° and 30° there exists a critical angle at which the size of the recirculating region becomes minimum and as the slant angle becomes larger than this critical angle the separation line moves along the slant towards the rear edge of the roof. Through the flow visualization technique, the existence of the two counter-rotating bubbles in the recirculating region has been clearly observed and verified.

기 호 설 명

A_M : 모형 및 주변장치의 최대단면적
 A_T : 시험부의 단면적
 C_p : 표면압력계수
 H : 모형의 높이
 k : 난류 운동에너지

L : 모형의 길이
 P : 압력
 P_0 : 접근유동의 정압
 q : 보정된 동압
 q_i : 지시동압
 R : 모형의 길이를 기준으로한 Reynolds수
 U : 접근유동속도
 u : x 방향 속도성분
 u', v' : 난류 요동성분

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과
** 서울대학교 대학원
*** 정회원, 서울대학교 대학원

W : 모형의 폭
 x, y, z : 길이방향, 수직방향, 폭방향의 직각좌표계
 ϵ : 난류운동에너지 소멸율
 ρ : 밀도
 θ : 후부 경사각

1. 서 론

자동차 산업에서는 최근에 연료경제성을 증진시키기 위하여 소형경량의 보다 효율적인 엔진의 개발, 차체축소 및 재료대체를 통한 가볍고 안전한 자동차 개발, 등 여러가지 방안에 대하여 많은 관심들이 기울여 지고 있으며, 이와 관련하여 공기역학적인 측면에서 매끄러운 외형설계를 통한 항력 감소 문제도 상당한 비중을 차지 하고 있다⁽¹⁻³⁾.

자동차가 주행할 때의 공기역학적 특성을 보다 잘 이해하고 이를 근거로 효과적인 외형설계를 하기 위하여는 풍동을 이용한 실차 또는 모형에 대한 실험적 연구가 수행되어야 하고, 아울러 컴퓨터를 이용한 수치해석적 연구도 병행하여 이루어져야 하는데, 이것은 아직도 많은 연구의 여지가 있는 유체역학의 중요한 연구분야에 해당된다. 사실상 이 문제는 오랜 역사를 가지고 있으나, 1970년대로부터 현재에 이르는 최근의 연구경향은 단순한 유선 형태에 가까운 외형설계 보다는 특정한 외형을 회생시키지 않으면서도 훌륭한 공기유동 특성을 얻을 수 있도록 자동차의 세부적인 형태를 최적화시키는데 주안점을 두고 있다⁽³⁾. 따라서 기계공학자들이 자동차의 외형설계에 대하여 공기역학적 원리를 본격적으로 적용하게 된것은 불과 10수년밖에 되지 않았다고 할 수 있다.

1973년에 Mason과 Sovran⁽⁴⁾ 이 "단순화된" 형태와 크기를 가지는 4개의 다른 척도의 (1/8, 1/6, 1/4 및 1/3) 모형들을 사용하는 풍동실험을 통하여 지면효과를 연구한 이래, 실제 승용차 또는 이들과 기하학적 상사를 이루는 모형들을 대상으로 하는 많은 실험적 연구들이 수행되었다⁽⁵⁻⁹⁾. 특히, 1983년에 Ahmed⁽¹⁰⁾는 시험부 $3m \times 3m \times 5.86m$, 최대 풍속 60m/s인 DEVLR 풍동내에서 1/4축척의 승용차 모형의 뒷면 경사각을 $0^\circ - 40^\circ$ 범위에서 변화시키는 실험을 수행함으로써, 후류 구조가 표면압력 분포, 와동의 운동에너지 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 1987년에 農沢隆季 등⁽¹¹⁾은 패스트 백 차체 후부 형상에 있어서 공기저항이 급증하는

임계형상이 존재하는 것과 마찬가지로 노치백 차체 후부 형상에 있어서도 유사한 임계형상이 존재한다는 것을 보고하였다. 이 실험적 연구에 사용된 풍동은 Mastuda사의 실차 풍동으로서 시험부가 $6m \times 4m \times 12m$, 최대풍속 64m/s이며 공기모형은 1/5축척의 승용차 모형이었다.

이상의 연구들과는 약간 다른 관점에서 1984년에 Ahmed 등⁽¹²⁾은 앞부분에서 박리가 발생되지 않도록 앞부분을 둥근 형태로 단순화시킨 모형, 즉 자동차형 물체(vehicle-like body)를 채택함으로써 보다 체계적이고 정밀한 실험을 수행하였다. 이 실험은 앞서 Ahmed⁽¹⁰⁾에서와 동일한 풍동에서 수행되었으며, 특별히 고안된 10공 프로우브를 사용하여 매우 정교한 방법으로 후류구조를 측정하였다. 중요한 연구결과 중 일부로서는 이 연구에서 채택된 자동차형 물체에 대한 전항력 중 85%가 압력항력이며, 앞부분은 이 압력항력 중 단지 9%정도만을 기여한다는 것이다.

자동차 주위의 유동에 대한 수치해석적연구도 1980년대에 들어서 매우 활발히 이루어지고 있는데, $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하여 2차원 자동차 주위의 난류유동에 관한 유한차분 계산을 수행하였던 몇 가지 예만 들더라도 1985년의 小林敏雄과 諸岡秀行⁽¹³⁾ 및 1986년의 Kitoh 등⁽¹⁴⁾이 있다. 또한 1986년에 小林敏雄 등⁽¹⁵⁾은 주로 1980년대에 이루어졌던 자동차 주위의 난류유동에 관한 많은 기존의 수치해석적 연구들의 수치해법, 난류모형, 좌표계, 차원(2 또는 3), 계산대상(fast, notch, square back), mesh수 등을 종합적으로 비교 검토하였으며, 이들이 2차원 차체 주위의 유동상태를 예측하는데 어떤 영향을 미치는가를 추가적으로 예시하였다. 1988년에 Han⁽¹⁶⁾은 역시 $k-\epsilon$ 난류모형을 채택한 SIMPLE 알고리즘에서 공액구배방법(conjugate gradient method)을 포함시킨 수치해석방법을 제안하였는데, 앞서의 Ahmed 등⁽¹²⁾의 실험에서 채택되었던 3차원 자동차형 물체 주위의 유동에 대한 계산결과를 뒷면 경사각이 30° 까지는 유동장의 주요특징들을 대체로 잘 예측하는 것으로 나타났다.

한편, 국내에서는 최근 수년간 이 분야에 관한 관심이 높아지면서 활발한 연구가 이루어지기 시작하려는 단계에 있다고 볼 수 있다⁽¹⁷⁻²⁰⁾. 특히 1987년에 배귀남과 박승오⁽²¹⁾ 및 1988년 성봉주와 장병희⁽²²⁾는 각각 노치 백자동차(약 1/10 모형) 및 벤형 자동차(1/20 모형)의 표면 유동가시화를 포함한

실험적 연구들을 수행하였는데, 전자는 뒷면 경사 각을 변하시킴에 따라 항력이 최대로 되는 임계현상의 존재를 확인할 수 있다는 것을 제시 하였으며, 후자에서는 5공 요헤드 프로우브(yawhead probe)를 이용함으로써 측정된 후류구조에 대한 상세한 설명이 주어졌다.

이상과 같은 기존연구들을 종합적으로 검토할 때, 역시 Ahmed 등⁽¹²⁾의 연구에서와 같이 단순화된 자동차형 물체 주위의 유동에 관하여 풍동을 이용한 기초적이고 체계적인 실험적 연구 및 수치해석적 연구로부터 시작하여 그 결과들을 서로 연계시켜 나가는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 승용차의 1/10 모형의 형상을 더욱 단순화시킨 2차원 자동차형 물체를 대상으로 하여 그 주위의 압력, 속도 및 난류량의 분포를 측정하고, 또한 울터프트(wool tuft)를 이용한 유동가시화기법으로 후류구조를 파악함으로써 향후 계속될 실험적 및 수치해석적 연구의 기초를 마련하고자 한다.

2. 실험장치

자동차의 공기역학적 성능에 관한 실험적 연구를 효과적으로 수행하기 위하여는 가용한 풍동의 명세에 적합한 실차 또는 모형이 선택되어야 할 것이다. 본 연구에서는 시험부의 크기가 900mm×900mm×3600mm이며 최대풍속 60m/s까지 풍속의 연

속조절이 가능한 Göttingen형 철제풍동이 사용되었는데, 이 풍동은 풍속 40m/s에서 균일도 0.3%, 난류강도 0.2%이내의 성능을 나타낸다.

풍동실험을 수행하는데 있어서 가장 중요하게 고찰되어야 할 점 중의 하나는 지면을 실제 주행조건에 가깝도록 시뮬레이션하는 방법인데, 주로 다음의 세가지 방법들이 있다⁽¹⁾. 첫째로, 지면판을 고정시키고 그 위에 모형을 위치시키는 고정 지면판법이다. 이 방법은 실험 장치를 꾸미기는 가장 쉬우나 두꺼운 경계층으로 인하여 실제 상황과는 많은 차이가 생기기 때문에 경계층의 영향을 줄이기 위하여 지면판의 앞부분에 곡률을 준다거나, 모형을 지면판으로부터 바퀴높이 이상 띄어 놓거나, 모형의 앞부분의 지면판에 슬릿(slit)을 만들어 흡입 또는 송출하는 등의 개선 방법이 연구되고 있다. 둘째로는, 지면판을 벨트식으로 만들어 자유유동속도와 같은 속도로 움직일 수 있게 하는 방법인데, 실제 상황과는 일치하는 방법이나 설치하기가 복잡해지는 단점이있다. 셋째로는, 지면판의 설치 대신에 지면판에 대칭되는 위치에 똑같은 모형을 만들어 상(image)을 고려해주는 방법인데 모형을 풍동내에 설치하기 어려워지고 봉쇄물(blockage)이 커지는 문제점이 발생한다. 이 방법들은 각각 별도의 노력을 필요로 하며, 장단점들을 가지고 있다. 본 연구의 목적달성을 위하여는 가장 단순한 고정지면판법만으로 충분하므로 이를 채택하기로 한다. 지면판은 두께 10mm의 아크릴로 제작하였으며 크기

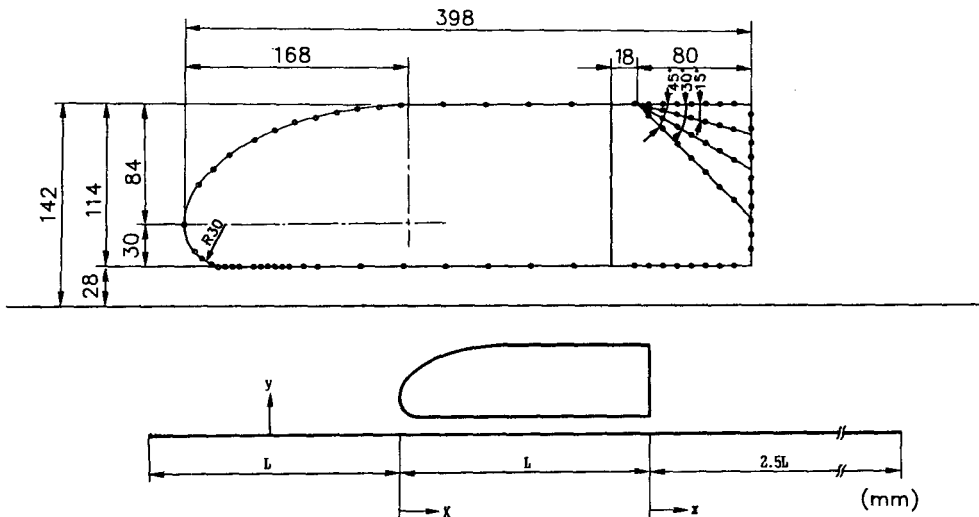


Fig. 1 Dimensions of the two dimensional vehicle-like body and the ground plane considered

는 폭 860mm, 길이 1800mm이고, 풍동 바닥면에서 100mm 높이에 I형 받침대로 고정되어 있다. 지면판은 모형 앞쪽으로 모형길이 만큼, 모형 뒷쪽으로 모형 길이의 2.5배 만큼 튀어 나오기에 충분할 정도로 길다. 이것은 지면판 뒤끝에서 모형의 후류와 지면판 밑을 지나는 유동과의 간섭효과를 줄이는데 필요하다⁽²³⁾.

Fig. 1에는 본 연구에서 채택된 단순화된 2차원 자동차형 물체와 지면판의 단면이 보여진다. 이 모형의 단면은 대체로 H자동차 회사의 소형 승용차의 1/10척도모형에 해당되는 길이(L) 398mm 및 높이(H) 114mm를 가진다⁽²⁴⁾. 자동차는 지면 가까이에서 이동하는 둔체(bluff body)로서, 뒷면의 박리유동 구역에서 지배적인 낮은 압력에 의하여 생성되는 압력항력이 공기역학적인 항력의 주요부분을 차지하므로⁽¹²⁾, 뒷면의 형상이 모형 주위의 유동구역에 미치는 영향을 효과적으로 고려하기 위하여, 모형의 밑면과 지면판과의 간격은 실제로 차체가 들어워진 높이에 해당되는 28mm만큼 띄우고, 모형의 각 부분은 다음과 같이 제작하였다.

모형의 앞부분은 박리가 발생하지 않도록 볼록하고 매끄러운 형태로 단순화하였다. 즉, 위면은 실제 승용차의 앞 범퍼 윗면을 기준으로 하여 장반경 168mm, 단반경 84mm의 2:1 타원형으로, 밑면은 반경 30mm의 4분원으로 처리되었다. 이와 같은 앞부분 처리 방식은 3차원 자동차형 물체에 대한 실험적 연구를 수행 하였던 Ahmed등⁽¹²⁾ 및 수치해석적 연구를 수행하였던 Rawnsley와 Glynn⁽²⁵⁾에서와 유사한 것으로서 다음과 같은 두가지 이유에서 채택되었다. 첫째, 비록 자동차의 항력 중 압력항력이 마찰항력에 비하여 훨씬 큰 비중을 차지한다 하더라도, 일반적으로 압력항력은 앞부분 보다 뒷부분에 의하여 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 둘째, 모형 앞부분을 기하학적 형상 그대로 상사시킬 경우에 수치해석상에 문제가 발생할 가능성이 높아지므로 Han⁽¹⁶⁾ 및 Rawnsley와 Glynn⁽²⁵⁾의 연구에서처럼 기초적이고 체계적인 실험 및 수치해석의 연계를 이루기가 어려울 수도 있다.

모형 중심부 주위의 유동이 충분한 2차원성을 유지할 수 있도록 폭(W)이 860mm가 되게 하였다. 그러나, 압력구멍 뚫기 및 모형내부에 스캐니벨브 설치를 용이하게 하기 위하여 모형은 폭 방향으로 3등분하여 분리제작 되었는데, 물론 풍동내에 설치

될 때는 빈틈없고 매끄럽게 볼트로 결합될 수 있도록 정밀한 가공이 이루어졌다. 2차원 모형을 채택한 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 자동차 주위의 유동은 매우 복잡한 현상이므로 가능한 한 측면와동(side vortex)으로 부터 독립적으로 재순환 영역을 포함한 후류가 모형 표면압력분포에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 둘째, 최근의 연구경향^(13~15)에서 나타나듯이 2차원 유동에 관한 실험적 연구를 통하여 수치해석기법 자체의 개발 내지는 개선에 보다 효과적으로 기여하고자 한다.

모형의 후부 경사각 θ 의 영향을 고찰하기 위하여 모형의 뒷부분은 앞부분과 분리 및 결합이 용이하도록 별도로 제작되었는데, 모형 뒤 끝면으로 부터 80mm지점을 기준으로 하여 후부 경사각 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 4가지 형태의 뒷부분들이 준비되었다. 참고적으로, 3차원 승용차 축척모형을 대상으로 한 Ahmed⁽¹⁰⁾의 실험적 연구에서는 고정된 경사면의 길이에 대하여 경사각을 $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 로 변화시켰으며, 3차원 자동차형 물체를 대상으로 한 Ahmed 등⁽¹²⁾의 실험적 연구에서는 고정된 뒷면 모서리에 대하여 경사각을 0° 로 부터 40° 까지 5° 의 단계로 변화시켰으므로, 후부 경사각이 후류구조 및 항력에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구에서는 이들의 연구내용을 토대로 하여 위에서와 같은 후부경사각들을 선정하였다.

이와같이 제작된 모형은 지면판의 선단으로 부터 450mm 및 650mm 떨어진 지점에서 중심 대칭면으로부터 좌우로 각각 280mm 떨어진 위치에서 4개의 볼트로 지면판에 지지된다. 여기서 한가지 지적되어야 할 것은 지면판 위 부분만을 고려할 때, 모형의 봉쇄율(blockage)이 약 14%로서 다소 높은 값이라는 점이다. 그러나 압력계수 측정에서 이에 대한 보정이 충분히 가능하고^(1,26), 또한 본 연구의 주요 목적이 후류구조의 정성적 관찰 및 실험과 수치해석의 효과적 연계이므로 유동의 2차원성이 유지되는 한 충분히 허용될 수 있을 것이다.

속도 측정을 위한 열선 프로우브를 2차원으로 자동차이송 시키기 위하여 2개의 스텝 모터와 2개의 리니어 헤드를 이용하여 이송 장치를 제작하였다⁽²⁴⁾. 최대 자동 이송 거리는 길이 방향으로 300mm, 상하로 210mm이다. 이 이송 장치는 풍동의 윗부분에 설치되어 프로우브는 아래로 매달리는 방식으로 부착된다.

3. 실험방법

실험은 표면압력 분포 측정, 평균속도 및 Reynolds 응력분포 측정, 중심면에서의 유동가시화의 3부분으로 나뉘어져서 수행되었다. 전체적인 자료처리 장치의 구성도는 Fig. 2에 보여진다. 우선 풍동내에 지면판만을 설치해 놓고, 지면판이 완전히 수평인가를 수준기로 확인한 후 선단 근처단면에서의 속도 분포를 미리 보정된 3공 피토투관 및 열선유속계로 측정하여 충분히 균일함을 확인하였고, 또한 누단 근처 단면에서의 속도분포를 측정하여 경계층 두께도 매우 균일한 것을 확인할 수 있었다. 모든 경우에 최대오차는 평균속도가 2%, 유동각도는 1°이내에서 균일한 속도분포를 나타냈으므로 유동의 2차원성은 충분히 유지된다는 것을 알 수 있었다. 모형이 설치된 경우에는 후단 근처 단면에서의 속도분포를 동일한 방법으로 측정된 결과, 모형 중심부의 충분히 넓은 범위에 걸쳐서 앞에서와 같은 정도의 균일한 속도분포가 얻어졌으며

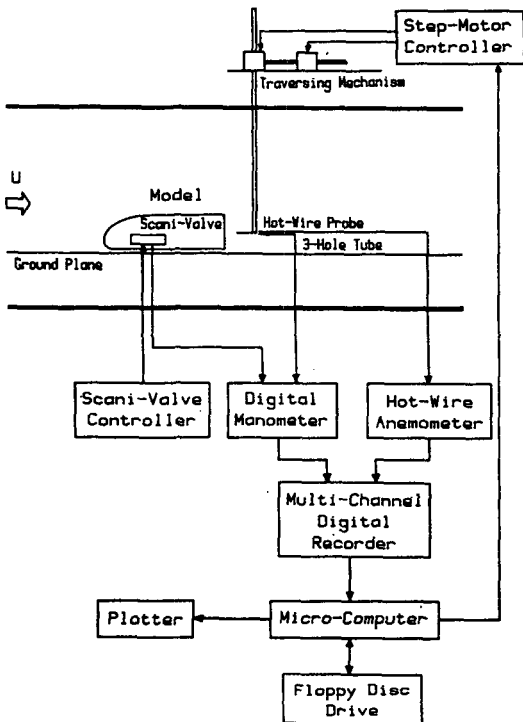


Fig. 2 Schematic diagram of the data acquisition system

로 유동의 2차원성을 확인할 수 있었다⁽²⁴⁾.

표면압력분포 측정을 위하여는 모형의 중심단면의 표면에 지름 1mm의 압력구멍을 48개 뚫어서 스테인리스 강으로 된 튜브들을 심음으로써 감지된 압력이 이들에 연결된 비닐튜브들을 통하여 모형 내부에 설치된 스캐니밸브에 도달되어 디지털 압력계로 측정되도록 하였다. 이 측정치들은 멀티 채널 디지털 레코더로 보내지고, 이어서 IEEE-488 인터페이스를 통하여 마이크로 컴퓨터로 보내져서 적절히 처리된다 이 데이터들은 일단 플로피 디스크에 저장된 후 나중에 계산되거나 도표작성에 사용 되는데, 본 연구에서는 모든 그래프를 HP7470A 플로터로 그렸다.

평균속도 및 난류량들의 분포는 주로 X형 열선 프로브를 사용하여 KANOMAX 열선유속계 및 리니어라이저, DC RMS 볼트미터, 애더, 섯랙터로 측정하였다. 이와같이 측정된 값들은 역시 멀티채널 디지털 레코더로 보내지고, 이후 이 값들의 처리 과정은 앞서 표면압력 측정방법에서와 같다. 평균속도 및 난류량들의 측정점들은 유동방향(x방향)으로는 모형 뒤끝면으로부터 40mm 떨어진 곳으로부터 320mm 떨어지 곳까지 40mm간격으로 8개의 위치, 그리고 수직방향(y방향)으로는 지면판으로부터 160mm의 높이까지 5mm 간격으로 32개의 위치에서(즉, 총 8×32개의 측정점들이) 선정되었는데, 나중에 토의될 바와 같이 재순환영역에 속한 부분은 데이터의 신뢰도가 낮아지므로 고려하지 않았다.

유동가시화를 위하여 울터프트(wool tuft) 방법을 채택하였는데, 울터프트 부착점들은 유동방향으로는 모형 뒤끝면으로부터 40mm 간격으로 10개의 위치, 그리고 수직방향으로는 지면판으로부터 20mm간격으로 9개의 위치(즉 10×9개의 위치)에서 선정되었다. 평균속도 및 난류량들의 측정결과에 비교를 위하여 동일한 자유유동속도 조건에 맞추어 사진촬영을 하였다.

4. 결과 및 검토

표면압력분포 측정은 자유유동속도 $U=20\text{m/s}$ 및 30m/s 의 경우에 이루어졌는데, 이는 모형의 길이(L)를 특성길이라고 하는 Reynolds수로서 $R=5.31 \times 10^5$ 및 7.96×10^5 에 각각 해당된다. 자유유동의 정압 P_s 를 기준으로 한 압력계수는 다음과

같이 정의되며,

$$C_p = (P - P_s) / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 \right)$$

봉쇄율을 고려한 동압의 보정은 잘 알려진 다음의 공식에 따른다^(1,26) :

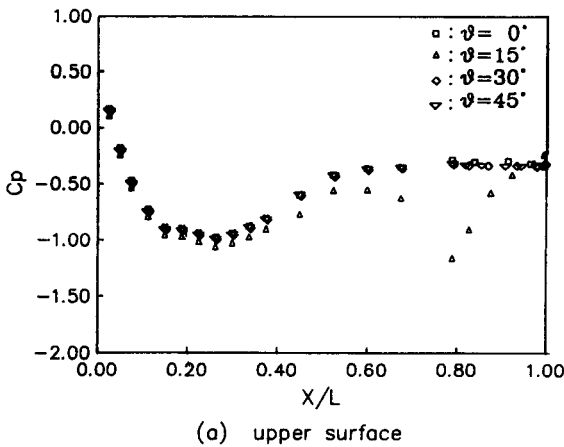
$$q = \left(1 + \frac{1}{4} \frac{A_M}{A_T} \right)^2 q_i$$

여기서, q_i 는 지시동압, A_T 는 시험부의 단면적, A_M 은 모형, 지면판, 주변장치의 최대 단면적을 나타낸다. Fig. 3에는 $R=7.96 \times 10^5$ 의 경우에 모형 윗면과 아랫면의 압력계수 C_p 의 분포를 나타내었다. $R=5.31 \times 10^5$ 의 경우의 C_p 의 분포는 거의 차이가 없으므로 생략하기로 한다. 풍동의 사양에 따른 한계성 때문에, 본 연구에서 보다 대략 10~15배의 Reynolds수로 대표되는 실제 주행조건

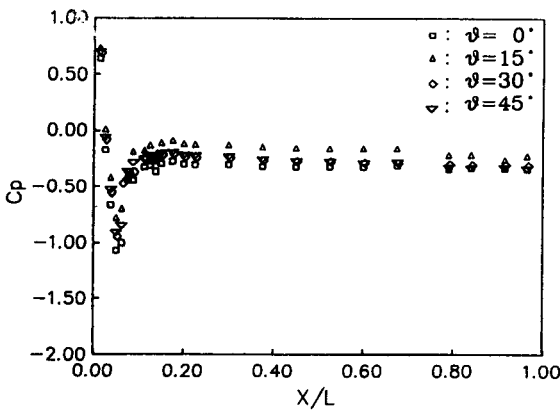
에 가까운 자유유동 조건을 풍동 내에서 만들어 낼 수는 없으나, 위의 사실로 미루어 보아 C_p 의 대체적인 경향은 큰 차이가 없으나, 위의 사실로 미루어 보아 C_p 의 대체적인 경향은 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 이는 더욱이 $R=2.2 \times 10^6$ 의 경우의 실차 크기의 모형 및 $R=1.2 \times 10^5$ 의 경우의 1/17.5 모형에 대한 위 표면에서의 C_p 의 측정치들을 비교하였던 小林敏雄 등⁽¹⁵⁾의 연구결과로 부터의 입증된다.

면적이 일정한 아랫면에서의 C_p 분포는 θ 에 따라 큰 변화가 없으므로 윗면에서의 C_p 분포가 역시 압력항력에 중요한 영향을 미치리라는 것을 알 수 있다. 윗면에서의 C_p 분포를 관찰함으로써 몇가지 중요한 사실들을 제안할 수 있다. 첫째, $\theta=15^\circ$ 보다 약간 큰 값의 범위에서, θ 가 증가함에 따라 재순환 영역의 크기는 점차 감소되리라는 것을 알 수 있다. 둘째, $\theta=30^\circ$ 와 45° 의 경우에는 일견하여 전체적으로 $\theta=0^\circ$ 의 경우와 비슷한 C_p 분포를 보이는데, 이것은 실은 $\theta=30^\circ$ 와 45° 의 경우에 박리선의 위치가 경사면이 시작되는 윗면 모서리로 옮겨져서 재순환영역의 크기가 다시 커지고 자유유동은 그 위로 지나는 것을 의미한다. 즉, 재순환영역은 일종의 "dead air" 영역으로서 그 경계에서의 압력과 같은 압력분포를 가지기 때문에, 여기서는 일정한 C_p 값을 가지는 것으로 나타난다⁽²⁷⁾. 셋째, 위의 두가지 사실로 미루어 보아, θ 의 증가에 따라 자유유동의 박리선의 위치가 윗면 모서리로부터 경사면이 시작되는 윗면 모서리로 점차적으로 또는 급격히 불안정하게 옮겨질 것이다.

위에서 고찰한 내용을 실제로 확인하고, 또한 본 연구와 병행하여 수행되고 있는 수치해석적 연구의 기초자료를 제공하기 위하여 $U=30\text{m/s}$ 의 경우에 θ 의 변화에 따른 모형 후류의 속도벡터를 Fig. 4에 나타내었다. 후류의 속도는 모형 뒷면으로부터 320 mm 떨어진 곳까지 측정되었는데, 다행히도 재순환 영역들이 이 측정범위내에 모두 포함될 수 있었다. 재순환영역에서의 역류는 열선유속계로 측정하는 것이 대단히 어렵고 신뢰성이 없으므로 이 그림에는 나타내지 않았다. 경사면 윗부분의 자유유동의 방향이 $\theta=15^\circ$ 의 경우는 경사면에 평행한 반면에 $\theta=30^\circ$ 와 45° 의 경우는 평행한 채로 진행하는 것과 재순환 영역의 크기가 $\theta=15^\circ$ 의 경우에 가장 작은 것 등을 확인할 수 있으므로, 표면압력계수분포 측정으로부터 유추된 내용들이 충분히 타당하다

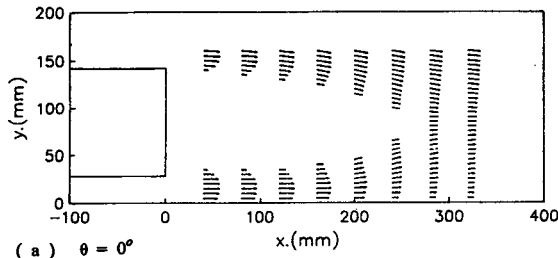


(a) upper surface

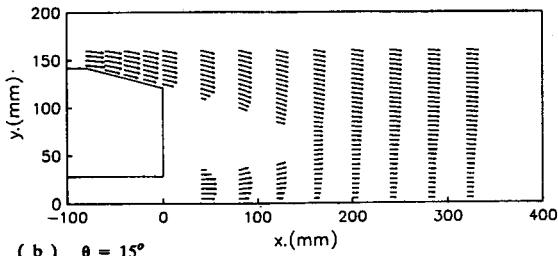


(b) lower surface

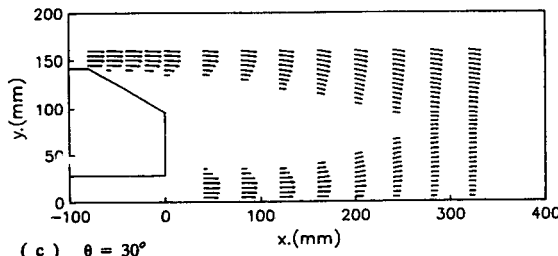
Fig. 3 Pressure coefficients for various base slant angles at $R=7.96 \times 10^5$



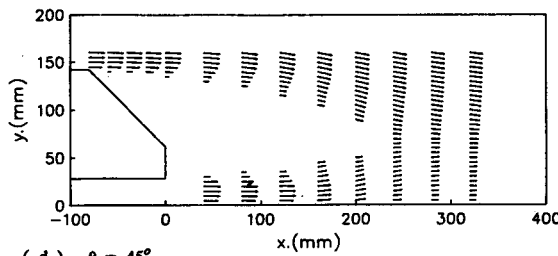
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 15^\circ$



(c) $\theta = 30^\circ$

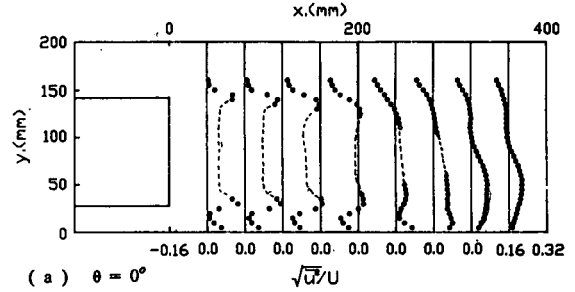


(d) $\theta = 45^\circ$

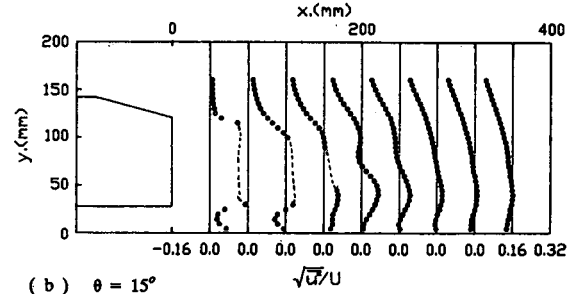
Fig. 4 Velocity distributions around the model

는 것이 입증되었다. 아울러 $\theta=30^\circ$ 이상의 경우에는 재순환영역의 크기에 큰 변화가 없는 것도 확인되었다.

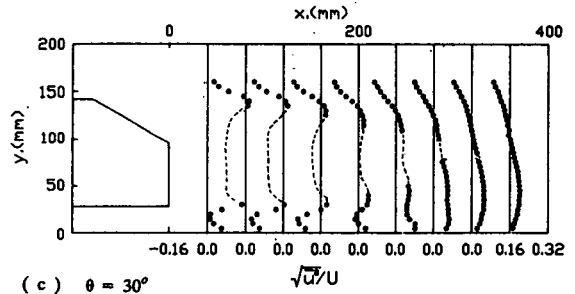
서론에서 이미 논의된 바와같이 자동차 주위의 유동을 시뮬레이션하기 위한 수치해법들은 채택되는 난류모형, 차분법, 격자의 크기 등에 따라서 그 결과에 많은 차이가 있을 수 있다. 그러므로 보다



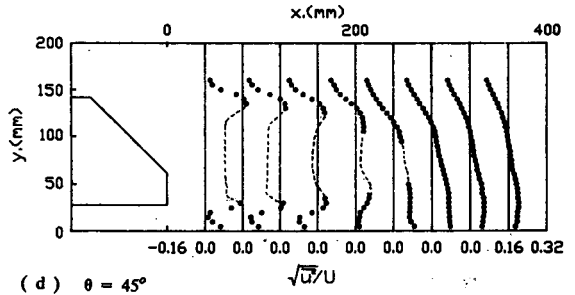
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 15^\circ$



(c) $\theta = 30^\circ$



(d) $\theta = 45^\circ$

Fig. 5 Turbulent intensity along x direction

정확한 수치시뮬레이션 방법을 개발하기 위하여는 자동차 주위의 유동의 평균속도 뿐만 아니라, 난류량들의 분포에 대한 이해를 필요로 한다. Fig. 5, 6, 7에서는 Fig. 4에서와 동일한 접근 유동속도 즉 $U=30\text{m/s}$ 의 경우에 유동방향 난류강도 $\sqrt{u'^2}/U$, 수직방향 난류강도 $\sqrt{v'^2}/U$ 및 Reynolds 응력성분 $-\overline{u'v'}/U^2$ 를 각각 표시하였다. 재순환 영역 내

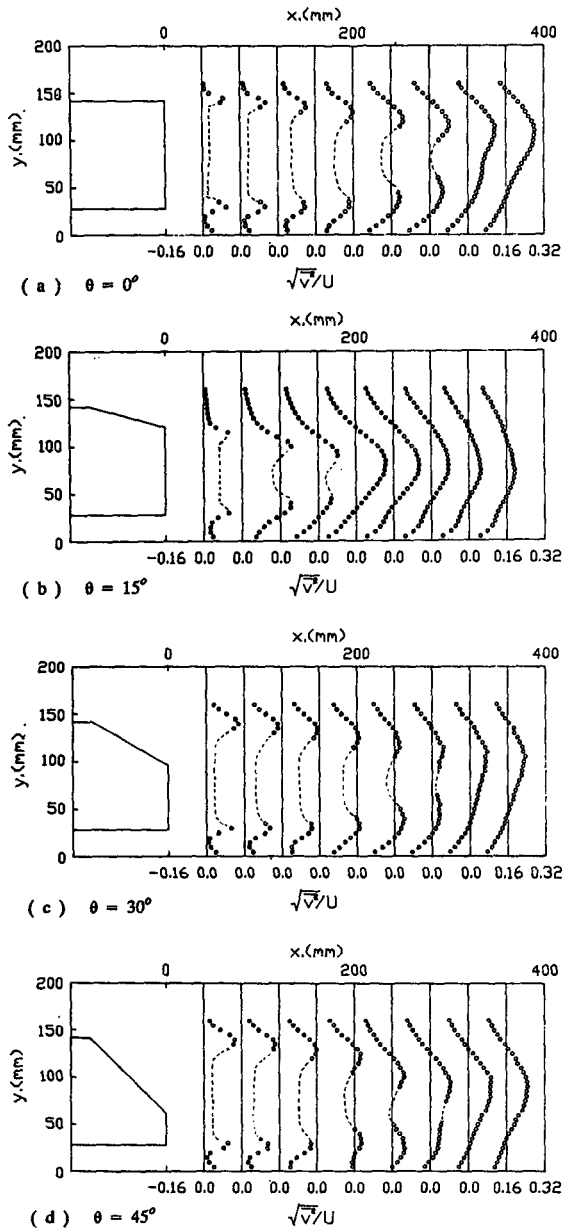


Fig. 6 Turbulent intensity along y direction

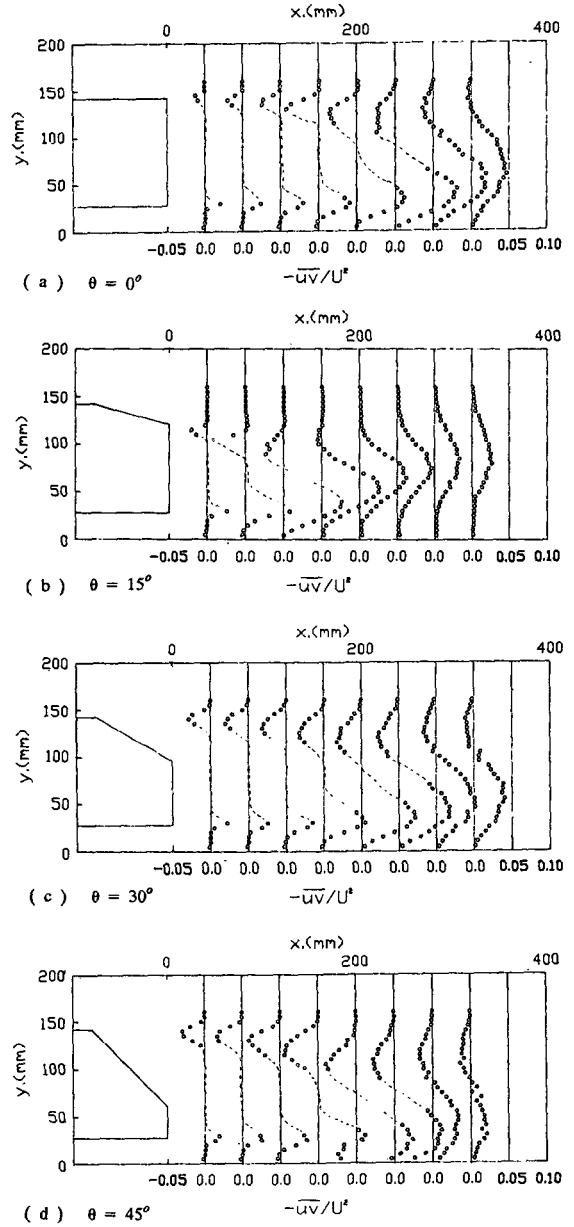


Fig. 7 Reynolds shear stress in the x-y plane

에서는 측정의 정확성을 기할 수 없고 대체로 정성적인 경향만 파악할 수 있으므로 추정치들을 점선으로 표시하였다. 이 세가지 분포들은 모두 du/dy 가 최대 또는 최소로 되는 위치에서 극대치 또는 극소치를 가지는 것을 보여준다. 특히 난류강도들의 극대치들은 위와 아래에서 2개가 생기다가 하류로 가면서 1개로 합쳐지는 것을 볼 수 있는데,

이는 재순환 영역이 끝나고 평균속도 분포가 점차로 평탄해져 감을 의미한다고 볼 수 있다. 난류모형에서 난류에너지 생성항은 $-\overline{u'v'} du/dy$ 로 나타나는데, 역시 속도구배가 큰 곳에서 $-\overline{u'v'}$ 도 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 8에는 $U=30\text{m/s}$ 에서 울터프트를 이용한 유동가시화 시험결과가 보여지는데, 이

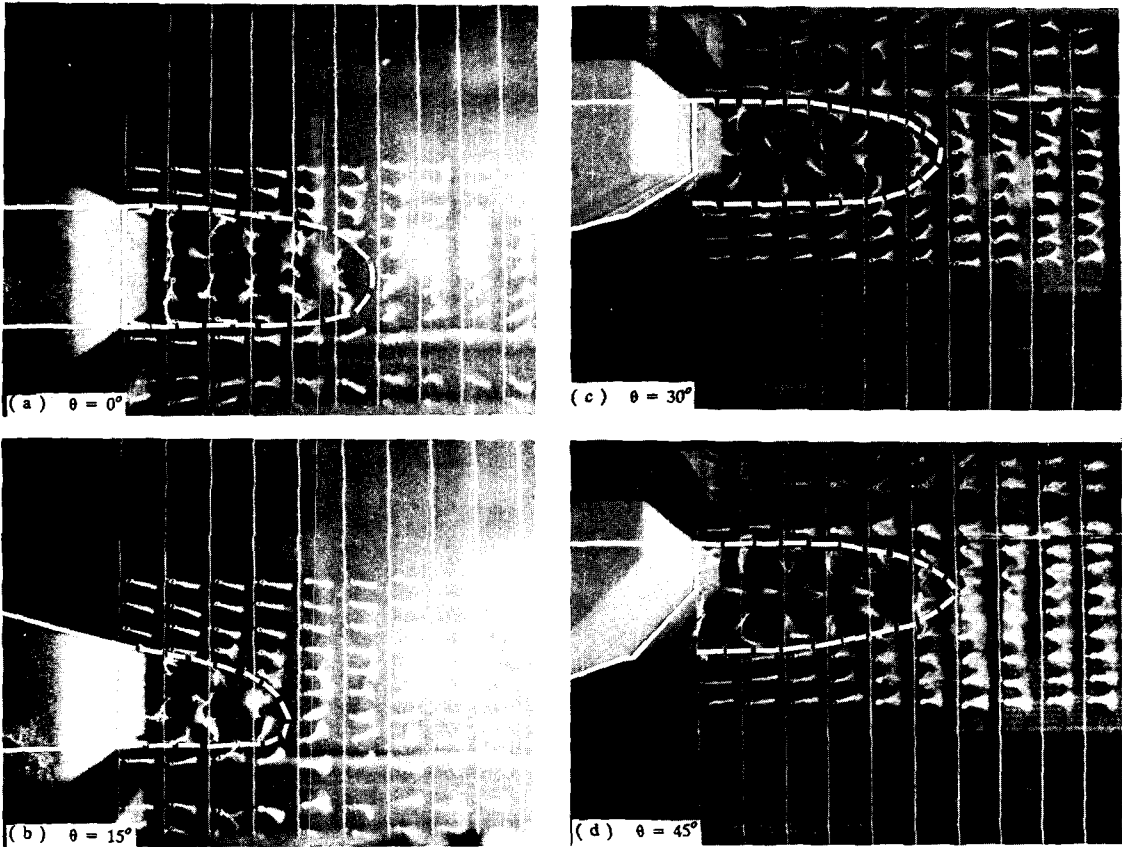


Fig. 8 Flow visualization using wool tuft method

실험은 시간 평균적인 관점에서 부터 재순환 영역의 크기, 역류 등 세부구조를 가시적으로 파악하기 위하여 수행되었으며, 그 결과 다음 사항들이 관찰 또는 확인될 있었다. 첫째 $\theta=15^\circ$ 인 경우에는 경사면 위의 자유유동이 경사면과 평행을 이루는 반면에, $\theta=30^\circ$ 와 45° 의 경우에는 역시 경사면이 시작되는 윗면 모서리에서 박리가 발생하는 것과 같이 자유유동이 윗면과 평행을 이루는 것이 뚜렷이 관찰된다. 둘째, 재순환 영역의 대체적인 경계는 흰 점선으로 표시하였는데, 재순환 영역의 길이는 역시 $\theta=15^\circ$ 의 경우가 대략 $0.4L$ 로서 가장 짧으며, 나머지 경우들은 대략 $0.6L$ 정도로서 비슷한 길이임을 알 수 있다. 셋째, Ahmed⁽¹⁰⁾ 및 Ahmed 등⁽¹²⁾과 같은 기존의 연구에서 처럼, 어느 경우든 재순환 영역 내부에는 2개의 서로 반대방향으로 회전하는 기포(bubble)들이 존재함을 볼 수 있다. 이상과 같은 사실들은 앞서 표면압력계수 측정

및 평균속도 측정결과와 일관성있게 일치하는 것을 확인할 수 있으므로, 2차원성이 지배적인 난류유동에서 울터프트를 이용한 유동가시화 실험은, 와이어와 티프트로 인하여 유동이 어느 정도 간섭받을 수도 있다는 우려에도 불구하고, 충분히 그 타당성이 인정될 수 있는 것이다. 실제로, 이 방법은 다음에서 더 상세히 논의될 Ahmed⁽¹⁰⁾의 유타액을 이용한 유동가시화 기법보다 설치 및 운용이 단순하면서도 더 뚜렷한 유동형태를 나타낼 수 있고 유동으로 인한 간섭의 우려가 덜 한 장점이 있다고 하겠다.

지금까지 고찰한 바와같이 2차원 모형의 후부경사각 θ 의 증가에 따른 후류구조의 변화단계에 대한 체계적인 연구는 아직까지 부압의 극소치를 가지는 C_p 분포에 관한 예는 $k-\epsilon$ 난류모형을 채택한 수치해석방법을 제안 하였던 小林敏雄 등⁽¹³⁾ 및 Kitoh 등⁽¹⁴⁾에서 비교를 위하여 제공된 실험자료들

로 부터 찾아볼 수 있다. 사실상, θ 의 증가에 따른 후류구조의 변화단계에 관한 연구는 주로 3차원 승용차의 축척모형들에 관한 실험적 연구를 수행 하였던 Ahmed⁽¹⁰⁾ 및 Hucho 등⁽⁹⁾에서 취급되었는데, 이들은 공통적으로 대칭평면에서의 후류구조에 많은 관심을 가졌다. 특히, Ahmed는 3차원 승용차 축척모형의 대칭 평면에 산화 알루미늄과 등유의 혼합물인 얇은 유막액을 바른 수직평판을 설치 하여 유동가시화실험을 수행하였다. 그의 Fig. 2에서는 θ 가 5° , 15° 및 30° 보다 약간 작은 값을 가질때 까지도 자유유동이 경사면을 따라 박리되지 않고 흘러 내려서 뒷면 모서리로부터 박리기포, 즉 재순환영역을 형성하며, 그러므로 박기기포의 크기가 점차 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한, $\theta=40^\circ$ 의 경우는 박리선이 윗면 모서리로부터 옮겨져서 박리기포의 크기가 다시 증가된 형태를 보여준다. 한편 그들의 중심면 압력분포 측정결과는 $\theta=15^\circ$ 보다 $\theta=30^\circ$ 의 경우에 윗면 모서리에서 더 예리한 부압의 극소치가 나타났는데, 이것은 재순환 영역의 크기가 최소로 되는 경사각에 해당된다. 즉 이는 3차원 승용차 축척모형 주위의 유동에서는 박리영역의 크기가 가장 작을때 저항이 가장 크다는 것을 의미한다. 이와 아울러 비록 3차원 승용차 모형이라 하더라도 θ 의 변화에 따른 대칭면에서의 후류구조의 변화 경향은 2차원 자동차형 모형의 경우와 흡사하다고 볼 수 있는데, 다만 3차원 모형의 경우에는 Ahmed의 주장과 같이 경사면으로부터 옆을 향하는 유동이 발생하므로 박리기포의 크기가 감소될 수 있는 θ 의 범위가 더 넓기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구를 기초로하여 더 수행되어야 할 연구로서는 경사면의 각도를 보다 세분하여, 이것이 후류구조 및 항력에 미치는 영향이 더 완전하고 체계적으로 이해하기 위한 연구가 있다. 이와 같은 연구가 필요한 이유로서는 첫째, 앞서 추측된대로 $\theta=15^\circ$ 까지는 뒷면 모서리에서 박리가 시작되다가 θ 가 점점 증가함에 따라 박리선이 경사면 위로 이동하여 대략적으로 $\theta=30^\circ$ 로 부터는 경사면이 시작되는 윗면 모서리에서 박리가 시작되는 것을 보다 정확하게 관찰할 필요가 있기 때문이다. 이는 마치 영각이 증가함에 따라 익형 윗면에서 박리점이 익형의 선연으로 이동하는 것과 유사한 현상으로서, 자동차의 항력감소 및 외형 설계에 응용될 수 있을 뿐 아니라, 바람직한 수치해석 코드의 개발에

도 많은 참고가 될 것이다. 그러므로 모형 뒷면의 하류뿐 아니라 가급적 모형의 윗면 및 경사면에서도 유동구조를 보다 정확히 파악할 수 있는 조치를 취하는 것이 더 바람직스럽다고 하겠다. 둘째는, 표면 압력계수분포 및 표면 근처의 속도 분포를 보다 정밀하게 측정 함으로써, θ 의 변화가 전항력에 미치는 총체적인 효과뿐 아니라, 모형의 각부분이 압력항력, 마찰항력* 및 전 항력에 기여하는 정도를 보다 정량적으로 검토할 필요가 있기 때문이다. 참고적으로, 3차원 패스트 백형 승용차에 대한 실차 또는 모형 시험결과는 거의 공통적으로^(8,11~13), 최소항력이 대체로 $\theta=10\sim15^\circ$ 의 범위에서 얻어지며, 최대항력은 $\theta=30^\circ$ 부근에서, 즉 재순환영역의 크기가 최소로 되는 θ 값에서 발생하는 것을 시사한다. 그러나 구체적으로 모형의 어느부분이 항력에 어느정도 기여를 하는지에 대하여는 아직도 많은 연구가 이루어져 있지 않다. 이 점에 관하여는 Ahmed등⁽¹²⁾이 그들의 모형중 $\theta=5^\circ$, 12.5° , 30° 인 모형들만 택하여 각각 400-500개의 압력구멍으로부터 측정된 값들의 축방향 성분만을 취하여 일일이 적분함으로써 규명하고자 시도하였다. 이는 매우 방대한 작업으로서, 2차원 모형에서는 보다 용이하게 이루어질 수 있을 것이다. 그리하여 유용한 실험자료들을 제공함으로써 θ 의 변화로 인하여 모형의 각 부분이 항력, 양력 및 피칭 모우먼트에 미치는 영향에 대하여 통찰력을 제공하고, 수치해석 코드의 개발에도 많은 도움을 줄 것이다. 또한 본 연구에서 채택되고 있는 기법들은 여러가지 부착물들, 예를들면, 스포일러(spoiler)나 에이프런(apron)등이 유동장에 미치는 영향에 대하여 보다 실차에 가까운 윤곽을 가지는 2차원 모형을 중심으로 연구하는데도 적용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

국산소형 승용차의 윤곽을 기초로 하여 단순화된 1/10 축척의 2차원 자동차형 물체 주위의 유동에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 특히 후부 경

* 일반적으로 자동차 주위의 마찰항력이 전항력 중에서 차지하는 비중은 압력 항력에 비하여 훨씬 작은 것으로 알려져 있고, 아무리 단순한 형태의 모형이더라도 그 주위의 속도분포 측정은 매우 까다로우므로, 이 부분의 연구는 생략되거나 단순히 마찰항력=전항력-압력항력으로 처리될 수 있을 것이다.

사각이 재순환영역을 포함한 후류에서의 유동이 미치는 영향을 중점적으로 고찰하기 위하여, 접근유동속도가 30m/s(모형 길이를 기준으로 한 $R=7.96 \times 10^5$)인 경우에, 스캐니벨브를 이용하여 표면 압력계수를 측정하였고, 열선 유속계를 이용하여 자유유동 평균속도 및 난류응력을 측정하였으며, 울터프트를 이용한 유동가시화 방법을 채택한 결과, 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

첫째, 후부 경사각 $\theta=0^\circ$ 로 부터 15° 근처까지의 범위에서는 자유유동이 경사면에 평행하게 흘러서, 박리는 모서리에서 일어나며, 재순환 영역의 크기는 점차로 줄어든다. 둘째, $\theta=30^\circ$ 이상의 범위에서는 박리는 경사면에 시작되는 윗면 모서리에서 일어나며, 재순환 영역의 크기에는 큰 변화가 없다. 셋째, 따라서, 아마도 $\theta=15^\circ$ 와 30° 사이에는 일종의 임계각도가 존재하고, θ 가 그 임계각도보다 큰 범위에서는 박리가 경사면 위의 한 위치에서 발생하며, θ 가 증가함에 따라 박리선의 위치는 윗면 모서리로 옮겨진다. 넷째, 2차원성이 지배적인 난류유동의 실험적 연구에서 울터프트를 이용한 유동가시화 기법은 충분히 정당하며, 본 연구의 경우에는 특히 재순환 영역내에 2개의 기포가 존재하는 것을 뚜렷이 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 1986년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제인 "자동차의 항력감소 및 외형설계에 관한 기초연구"의 학술연구구성비의 일부로 수행되었으므로, 관계당국에 대하여 심심한 감사의 뜻을 표합니다. 아울러 자료정리에 많은 도움을 준 장 성원군의 수고에도 감사합니다.

참 고 문 헌

- (1) "Automotive Aerodynamics", Progress in Technology Series, No. 16, 1978, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (2) Holt, D. J., 1981, "Aerodynamics: the New Automotive Frontier." Automotive Engineering, Vol. 89, No. 1, pp. 50~59.
- (3) Hucho, W. H., Janssen, L. J., and Emmelmann, H. J., 1979, "The Optimization of Body Details-a Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles," SAE/PT-79/18.
- (4) Mason, Jr., W. T., and Sovran, G., 1973, "Ground-Plane Effects on the Aerodynamic Characteristics of Automobile Modes-an Examinations of Wind Tunnel Test Technique," Research Publication, GMR-1378, Res. Lab., GM Corporation.
- (5) Schenkel, F. K., 1977, "The Origins of Drag and Lift Reductions on Automobiles with Front and Rear Spoilers," SAE Paper No. 770389.
- (6) Hucho, W. H., 1978, "The Aerodynamic Drag of Cars-Current Understanding, unresolved problems, and future prospects," in Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles, Plenum Press, N. Y. -London.
- (7) Buchheim, R., Deutenbach, K. -R., and Luckoff, H. -J., 1980, "Necessity and Promises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars", SAE Paper 810185.
- (8) Bearman, P. W., 1980, "Review-Bluff Body Flows Applicable to Vehicle Aerodynamics," Journal of Fluids Engineering, Vol. 102, pp. 265~274.
- (9) Holt, D. J., 1982, "Underbody Aerodynamics: the Next Area of Refinement?," Automotive Engineering, Vol. 90, No. 10, pp. 57~62.
- (10) Ahmed, S. R., 1983, "Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles," J. Fluids Engineering, Vol. 105, pp. 429~434.
- (11) 農沢隆季, 日浅一彦, 吉本勝, 1987, 車体後部流れと空力特性の研究 -第2報-, "マツダ 技報, 第5號, pp. 98~106.
- (12) Ahmed, S. R., Ramm, G., and Faltin, G., 1984, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," SAE Technical Paper Series 840300.
- (13) 小林敏雄, 諸岡季行, 1986, " $k-\epsilon$ モデルを用いての二次元車体周りの乱流予測," 日本機械學會論文集 (B編), 第51卷, 第466号, pp. 1962~1965.
- (14) Kitoh, K., Kobayashi T., and Morooka, H., 1986, "Effects of Boundary Conditions of Numerical Turbulent Flow Around a Two-Dimensional Vehicle by $k-\epsilon$ Model," Proceedings of the International Conference on Computational Mechanics, Vol. 2, VII77~82.
- (15) 小林敏雄, 鬼頭幸三, 谷口伸行, 1986, "自動車まわりの流れの数値シミュレーション- $k-\epsilon$ 乱流モデルによる数値解の比較例-, 日本 東京大學 生産技術研究所, 生産研究, 第38卷, 第12号, pp. 543~549.
- (16) Han, T. Y., 1988, "A Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Around a Bluff Body in Ground Approximity", '88국내외 한국과학

- 기술자 학술회의 춘계 Workshop 기제공학분과 교재, 한국과학기술단체총연합회, pp. 95~118.
- (17) 이동호, 강신형, 1984, "파넬법을 이용한 자동차의 외형설계", 한국자동차공학회지, 제6권, 제4호, pp. 54~61.
- (18) 이동호, 노오현, 우종응, 김현수, 1986, "풍동실험 및 컴퓨터를 이용한 자동차 외형의 공기역학적 설계", 대한기계학회 '86년도 춘계학술대회 초록집, pp. 548~552.
- (19) 최도형, 최철진, 1986, "점성-비점성 유동 반복계산 방법을 이용한 2차원 자동차 모형의 공력 특성 예측", 자동차공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 52~61.
- (20) 최장섭, 최도형, 박승오, 1988, "자동차 중앙대칭단면 부근의 3차원 경계층 계산", 자동차공학회지, 제10권, 제2호, pp. 61~69.
- (21) 배귀남, 박승오, 1987, "노치-백 자동차의 공기역학적 임계 현상에 관한 실험적 연구", 자동차공학회지, 제9권, 제5호, pp. 41~48.
- (22) 성봉주, 장병희, 1988, "Van 형 자동차의 후류구조에 대한 실험적 해석(와류 형성을 중심으로)", 자동차공학회지, 제10권, 제3호, pp. 51~59.
- (23) Ahmed, S. R., 1981, "Wake Structure of Typical Automobile Shapes", J. Fluids Engineering, Vol. 103, pp. 162~169.
- (24) 김사량, 1988, "단순화된 2차원 자동차 모형 주위의 유동에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문.
- (25) Rawnsley, S. M., and Glynn, D. R., 1986, "Flow Around Road Vehicles" in Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes, Ed. by Markatos, N. C., Springer-Verlag.
- (26) Rae, Jr., W. H., and Pope, A., 1984, "Low Speed Wind Tunnel," 2nd Ed., John Wiley and Sons.
- (27) Schlichting, H., 1979, "Boundary Layer Theory," 7th Ed., McGraw Hill.