

# 風洞實驗에 의한 승용차의最適外形決定에 관한 研究

## Determination of Aerodynamic Configuration of Passenger Car by Wind Tunnel Experiment

김근호\*·노오현\*\*·조경국\*\*  
K. H. Kim, O. H. Rho, K. K. Cho

### Abstract

The aerodynamic characteristics of the most popular car (PONY 2) produced in Korea have been experimentally investigated by Seoul National University's wind tunnel. The model (PONY 2) chosen for the wind tunnel was a 1/5 scale of the original car without simulated underbody, cooling air flow and accessories. The measured aerodynamic drag coefficient corrected by JARI formula is 0.45 which is very close to those of small foreign cars.

To see the effect of the different configurations on the aerodynamic drag, the modifications have been made by changing the hood slope and backlight slope, and putting the add-on-aerodynamic devices on the original shape. The rear spoiler was found the most effective one to reduce the aerodynamic drag. It may be concluded that the considerable aerodynamic drag reduction can be achieved by changing the slopes and A-O-A devices at the proper places of the car.

### 1. 序 論

1970 年代 初의 에너지위기 以後 자동차의 공기저항을 감소시키기 위한 연구가 다시 활발해지기 시작했다. 그전에는 저항감소에 대한 연구는 주로 자동차의 最高速度를 높이는데 대한 연구이었으나 오늘날에는 연료절감을 위해서이다. 車의 저항은 두 가지로 되어있다. 자동차의 타이어와 지면과의 마찰에 의한 굴림마찰저항(rolling resistance)과 차 표면과 공기와의 상호작용에 의한 공기저항(air drag)으로 되어 있다.

굴림마찰저항은 굴림마찰계수와 車의 무게의

곱으로 주어지므로 굴림마찰저항 감소는 車의 중량을 줄임으로써 이루어질 수 있다. 그래서 오늘날에는 가능하면 철대신 플라스틱部品으로 대체하고 있으며 한편으로는 後輪驅動 대신 前輪구동으로 바꾸고 있다.

공기저항은 물체 표면에 작용하는 압력 및 전단응력에 기인하며 압력 및 전단응력 분포를 표면 전체에 대하여 적분함으로써 계산된다. 공기저항중에서 압력분포에 의한 저항을 압력저항이라 하고 전단응력 분포에 의한 저항을 표면마찰저항 또는 점성저항이라 한다. 공기저항에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 1 에서 보여준 두 경

\* 現代自動車株式會社

\*\* 서울大學校 工科大学

우의 극단적인 공기 역학적 물체를 생각하자. 앞부분이 뾰족한 물체(blunt body)와 유선형 물체(streamlined body)이다.

Fig. 1a에서는 뾰족한 물체에 속하는 柱狀체 주위의 非粘性 유동과 점성유동에서의 압력분포를 보여주고 있다. 비점성 유동에서는 紙面에 수직인 대칭면에 대하여 압력이 대칭이기 때문에 압력저항은 없다. 그러나 粘性 유동에서는 압력이 증가하는 주상체 표면에서는 경계층 박리가 발생하게 되고 경계층 박리 유장에서는 매우 낮은 압력이 균일하게 작용하게 된다. 즉 대칭면 앞에는 높은 압력 분포가, 뒤에는 낮은 압력 분포가 형성되어 큰 압력저항이 발생하게 된다.

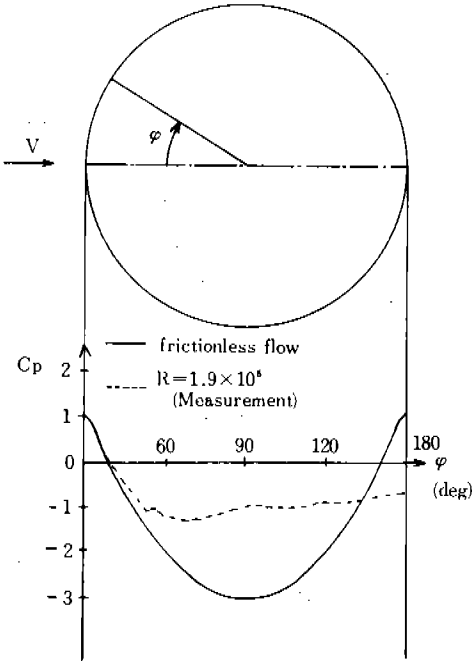


Fig. 1a. Pressure distributions on a circular cylinder from the inviscid flow theory and the real viscous flow measurement.  $C_D=1$ . Pressure drag is dominant over the viscous drag.

그러나 Fig.1b에서와 같은 유선형 물체 유동에서는 경계층 박리가 발생하지 않으며 실제 표면 압력분포는 비점성 유동에서의 압력분포와 거의 같다. 그러므로 압력저항은 거의 없으며 유선형 물체의 전체저항은 大部分 전단응력분포에 의한 점성 저항으로 되어있다.

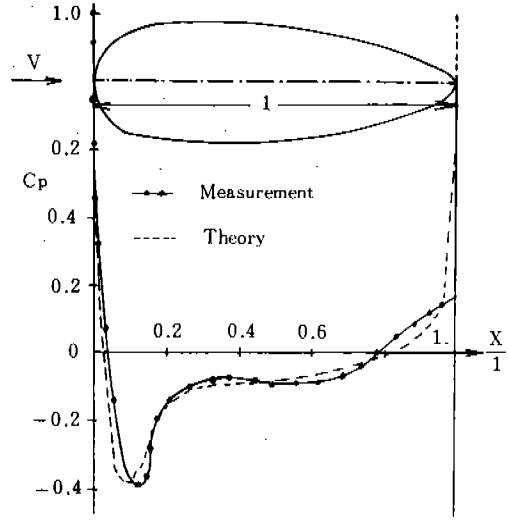


Fig. 1b. Pressure distribution about a streamlined body of revolution: Comparison between inviscid theory and real flow measurement.  $C_D < 1$ . The viscous drag is dominant over pressure drag.

그러면 위에 기술한 두 경우의 물체에 작용하는 전체 저항을 이해하기 위하여 Fig. 2를 보자. Fig. 2에서 하나는 앞부분이 뾰족한 물체의 代表的인 物体인 직경이 d인 柱狀체이고 다른 하나는 流線形 物体인 길이가 원주 직경의 167배인 비행기의 날개(NACA63,-021)이다. 이 두 물체에 작용하는 전체 저항은 같다.<sup>(1)</sup> 柱狀체 유동에서는 항상 유동 박리가 발생하게 되며 그 결

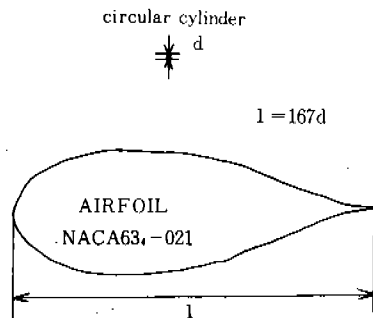


Fig. 2. Airfoil and circular cylinder drawn in such relation to each other as to produce the same drag in parallel flows of the same velocity. Airfoil: Laminar airfoil NACA63,-021. Drag coefficient  $C_D=0.006$  at  $Re_l=10^5$  to  $10^7$ . Circular cylinder:  $C_D=1.0$  at  $Re_l=10^4$  to  $10^5$ . Thus the ratio of the chord of the airfoil,  $l$ , to the diameter,  $d$ , of the cylinder is  $l/d=1.0/0.006=167$ .

과 큰 압력저항을 가져오게 되나 유선형 물체에서는 흐름 박리가 일어나지 않으며 저항은 전단 응력 분포에 의한 점성 저항이 대부분이다. 흐름 박리가 일어나게 되면 압력저항이 점성저항보다 훨씬 크게 된다.

자동차의 경우에는 압력저항이 전체저항의 약 90%, 점성저항이 약 10%를 차지 한다. 자동차에서는 자동차의 중량이 주어지면 자동차의 저항을 감소시키기 위하여서는 자동차를 유선형으로 만드는 것이 가장 바람직함을 알 수 있다. 예를들면 오늘날 승용차의 항력계수가  $C_D=0.4$  정도이며 단면 NACA 63, -021를 갖는 비행기 날개의 항력계수가  $C_D=0.006^{(1)}$  이므로 자동차를 비행기 날개와 같이 만들때 항력은 약 60배 감소시킬 수 있다.

오늘날 승용차에 있어서 속도 55mph (88Kmh)에서 10%의 공기 저항 감소는 5% 연료절감을, 속도 70mph (112Kmh)에서는 6%<sup>(2)</sup>의 연료절감을 가져오므로 만약에 공기저항을 60% 감소시키면 막대한 연료절감을 가져올 수 있다.

다음으로 승용차의 공기저항과 굴림마찰저항과의 관계를 그려 보면 Fig. 3<sup>(3)</sup> 과 같다.

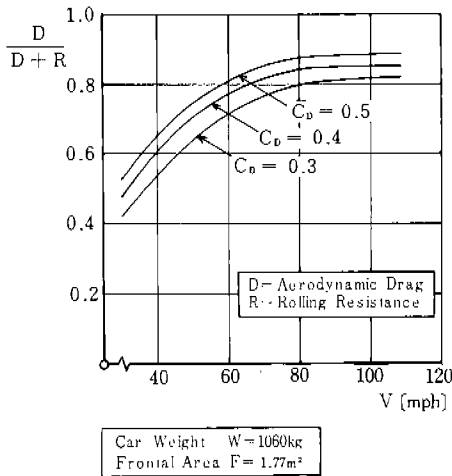


Fig. 3. Ratio of aerodynamic drag to total external drag (= aerodynamic drag + rolling resistance) of car.

Fig. 3으로 부터 알 수 있는 것과 같이 항력 계수가 0.5인車が 속도 40mph로 달릴 경우 공

기저항은 전체저항의 65%를 차지하며, 속도 80mph로 달릴때의 공기저항은 전체저항의 90%를 차지한다.

다음으로 자동차의 속도와 연료경제 FE (FE = 연료 1 갤론당 주행거리)에 대한 그림이 Fig. 4에 그려져 있다. 예를 들어 40mph로 주행할 때  $C_D=0.5$ 인 車의 연료경제 FE는 38mpg이고, 항력계수  $C_D=0.4$ 인 車의 FE는 40mpg이고, 항력계수  $C_D=0.3$ 인 車의 FE는 43mpg이다. 그런데 車의 속도를 40mph에서 80mph로 증가시키면  $C_D=0.5$ 인 車의 FE는 23mpg이고,  $C_D=0.4$ 인 車의 FE는 27mpg이고,  $C_D=0.3$ 인 車의 FE는 31mpg이다. 여기에서 알 수 있는 것은 속도가 증가함에 따라 FE는 떨어지며 항력계수가 높은 車일수록 떨어지는 폭이 크다. 이것은 車의 굴림마찰저항은 일정하므로 속도가 증가되면 공기저항이 얼마나 크게 작용하고 있나를 보여준다.

그러므로 본 연구문에서는 국내에서 생산·판매되고 있는 대표적인 車種을 (PONY2) 선정하여 서울工大 아음속 풍동을 이용하여 공기역학적 특성을 실험적으로 조사함과 동시에 기본형에 추가적으로 공기역학적 장치 (AOA 장치 = Add-On-Aerodynamic Device)와 부분적인 수정을 하여 다시 풍동실험을 행하여 공기역학적 자료를 얻는 데 목적을 두었다.

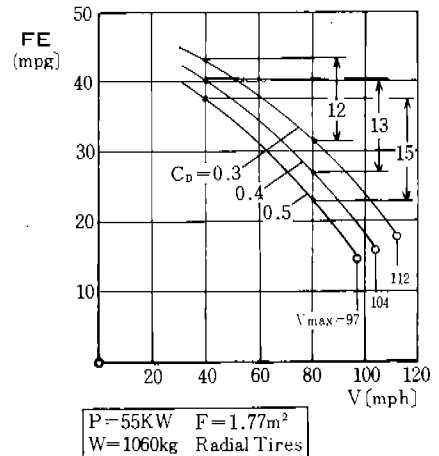


Fig. 4. Effect of air drag reduction on steady state fuel economy.

## 2. 풍동 실험

### 2.1 실험 장치

#### (a) 서울工大 풍동

풍동의 諸元 및 특성은 다음과 같다.

型 式 : 연속 폐회로 순환형

試 驗 部 : 38"×54"×8'

收 縮 比 : 6.16

速度범위 : 0 ~ 70m/sec

난류계수 : 1.4

구동모타마력 : 75HP

#### (b) 풍동실험용 자동차 모델

풍동실험에 사용한 모델은 실제 크기의 1/5 尺度의 현대자동차의 PONY 2로 車體 하면과 방열기 및 머플러 등은 복제하지 않았다. 모델의 전면 투영 단면적은 0.0654m<sup>2</sup>로 풍동 시험부 단면적의 4.8%를 차지한다. 모델의 주요 諸元은 다음과 같다.

전면 투영 단면적 : 0.0654m<sup>2</sup>

全 長 : 806mm

全 幅 : 313mm

全 高 : 265mm

軸 距 : 468mm

輪 距 : 前260mm

後256mm

타 이 어 : 6.15×13-4 PR 155 SR13

#### (c) 지면 효과

차가 도로위를 달리는 것과 같은 효과를 나타내기 위한 방법으로 이미지법과 이동벨트법, 그리고 정지평판법 등이 있다.<sup>(4,5,6)</sup> 이미지法은 車를 상하 대칭으로 배치하는 것으로 장치가 어렵고 풍동 시험부의 블록지 (blockage) 영향이 큰 것이 단점이다. 이동벨트법은 차를 이동벨트 위에 살짝 띄워 설치하여야 하며 벨트 속도를 流速과 맞추어야 한다. 정지 平板法은 車를 정지평판으로부터 경계층 영향을 무시할 수 있도록 일정한 높이로 띄어 설치하는 것으로 장치가 간단하나 완전한 지면 효과를 낼 수는 없다. 본 연구에서는 장치가 간단한 정지 평판법을 택

하였고 평판으로부터의 높이는 평균 경계층 변위 두께로 하였다.

#### (d) 공기력 측정 및 流動 可視化장치

車의 모델에 작용하는 공기력 측정을 위하여는 자동차 모델 측정용으로 플랫폼 3分力 (抗力, 揚力, 핑칭 모멘트) 스틱 발란스를 직접 설계 제작하였다.<sup>(7)</sup> 흐름 可視化는 熱線 방법에 의하였으며 열선방법은 직경 0.1mm이고 1cm 당 1Ω의 저항을 갖는 스테인레스 강선을 車前 方流에 장치하고 액체 파라핀을 열선에 얹게 묻힌 후 순간적으로 가열하면 파라핀 증기가 발생하여 강선 1cm에 약 10개의 스트리크선을 만들 수 있었다. 열선에서 발생하는 증기 발생시간은 약 2초 정도의 짧은 시간이므로 열선을 가열하고 조명과 촬영을 순간적으로 동시에 행할 수 있는 싱크로너스 장치를 제작하였다.<sup>(7)</sup> 열선에 흐르는 전류는 직렬 연결된 可變저항을 조절하여 풍속에 알맞는 연기를 내도록 할수 있으며 0.1mm 열선에서는 풍속 2m/sec시에 1.25amp로 적당한 스트리크선의 밀도를 낼 수 있었다.

## 2.2 실험 결과 및 검토

#### (a) 공기력 측정

자동차에 작용하는 抗力, 揚力 및 핑칭 모멘트를 자동차 전용으로 설계 제작한 3分力 스틱 발란스를 Fig. 5와 같이 장치하여 속도를 증가시키면서 측정하였다. 발란스는 캘리브레이션 장치를 통하여 캘리브레이션을 행하였고 항력과 핑

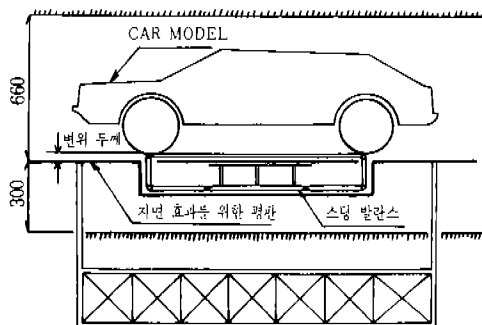


Fig. 5. Experimental set-up of model of car.

칭 모멘트는 0.5% 오차 이내로 측정할 수 있었으나 揚力은 항력과의 카플링이 커서 특별히 분리 연산 회로를 만들었으나 0.5% 오차 범위 이상 이었다.<sup>(7)</sup>

抗力 D 와 핏칭 모멘트 P<sub>m</sub>은 다음과 같이 無次元化 하였다.

$$\text{항력계수} : C_D = \frac{D}{qA}$$

$$\text{핏칭 모멘트계수} : C_{pm} = \frac{P_m}{qAb}$$

여기서 q는 前方流의 動圧으로  $q = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ 이며, A는 모델의 전면 투영 단면적이고, b는 軸距이다.

C<sub>D</sub>, C<sub>pm</sub>을 레이놀즈數  $Re = \frac{U_\infty b}{\nu}$ 에 대하여 그려 보면 各各 Fig. 7, 8, 9와 같다.

Fig. 7, 8, 9에는 PONY 2의 기본형 외에 Fig. 6에서와 같이 기본형에 가이드 베인, 리어 스포일러와 같은 AOA 장치와 리딩 에지 경사, 백경사, 후드 경사 등을 수정하였고 수정된 모델에 대한 C<sub>D</sub>, C<sub>pm</sub> 측정값이 함께 그려져 있다. 일반적으로 C<sub>D</sub>, C<sub>pm</sub>은 레이놀즈數의 함수이나  $Re = 2 \times 10^4 - 4 \times 10^4$  이상에서는 레이놀즈數에 별로 영향을 받지 않는다.<sup>(8)</sup> 본 실험에서는 최대  $Re = 1.4 \times 10^5$ 까지 할 수 있었다. Fig. 7에서 알 수 있는바와 같이 PONY 2 기본형의 항력계수 C<sub>D</sub>는 레이놀즈數에 대한 변동이 심함을 보여주고 있으며  $Re \sim 10^4$ 에서 C<sub>D</sub> = 0.527이다. 가이드 베인을 장치하였을 때는 C<sub>D</sub> = 0.505로 항력이 감소되었고 백 경사를 수정하였을 때는 오히려 항력이

약간 증가되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 리딩 에지 수정, 후드 경사 수정 및 리어 스포일러를 장치한 모델에 대한 항력계수 그림이다. 리어 스포일러 장치가 항력감소에 제일 효과적임을 알 수 있다.

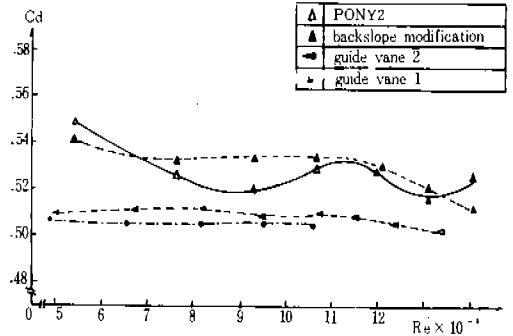


Fig. 7. Drag measurement.

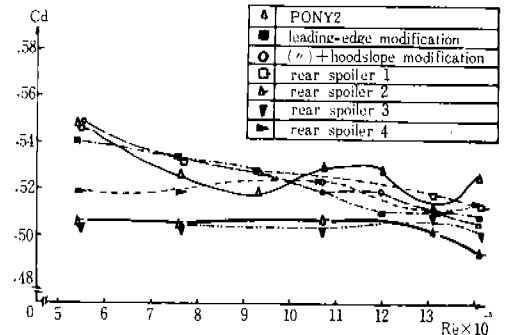


Fig. 8. Drag measurement.

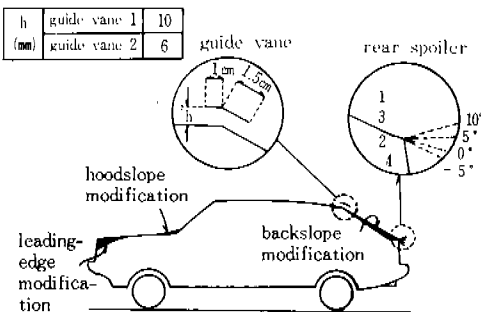


Fig. 6. Modified car model.

그리고 Fig. 9는 레이놀즈數에 대한 핏칭 모멘트 계수변화를 보여주고 있다. 레이놀즈數가 증가함에 따라 -C<sub>pm</sub>은 증가함을 보여 주는데 이것은 노스다운 핏칭 모멘트가 증가하게 되어 高速에서 안정성이 증가됨을 나타내 준다.

이상의 값들은 풍동 시험부내의 여러가지 간섭 효과를 보정하지 않은 측정치이며 자동차의 풍동 실험시 일반적으로 채택하고 있는 JARI<sup>(9)</sup> 보정식을 사용하였을 때의 보정된 항력계수는 표

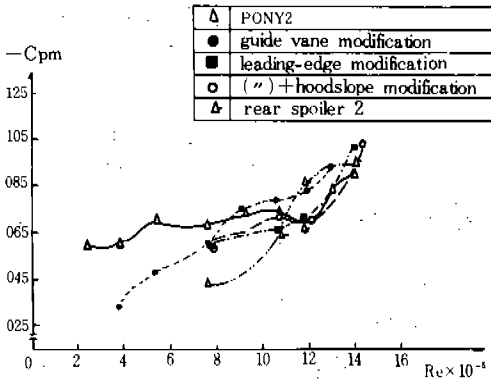


Fig. 9. Pitching moment m asurement.

1 과 같다.

표 1 에서  $C_D$  는 측정치이며  $C_D^*$  는 JARI 보정식을 사용한 보정된 항력계수이다.

JARI 보정식 :  $C_D^* = [(S - A)^2 / S^2] \times C_D$

여기서 A 는 모델의 전면 투영면적이며 S 는 풍동 시험부 단면적이다.

표 1. 보정된 항력 계수

수정된 모델	C	C <sub>D</sub> <sup>*</sup>	비 고
기본형(PONY 2)	0.527	0.45	
리딩 에지 수정	0.522	0.446	0.95% 항력감소
백 경사 수정	0.531	0.453	0.76% 항력증가
가이드 베인	0.505	0.431	4.2 % 항력감소
리어 스포일러	0.501	0.428	4.9 % 항력감소

그리고 외국의 소형 승용차의 항력 계수를 비교하여 보면 표 2 와 같다.

표 2. 외국차와의 항력 계수비교

차 명	항 력 계 수
PONY 2	0.45
Honda Accord	0.42
BMW 316	0.45
FORO Escot	0.45
G. M. Citation	0.42
Saab 900	0.43
Volkswagen Golf	0.42

표 2 에서 보여 주는 것과 같이 PONY 2 의 항력계수는 외국차의 값과 별 차이가 없음을 알 수 있다.

(b) 流動의 可視化 실험

위에 기술한 熱線方法에 의하여 모델 주위의 스트리크線을 조사 관찰하였다. 속도는 2 m/sec 이고 레이놀즈數로는  $Re = 5 \times 10^4$  이다. Fig. 10 은 車 對稱面의 앞 부분을 따른 파라핀 증기의 流線을 보여주고 있다. 車 후드와 윈드 실드를 따라 경계층 박리를 볼 수 있다. Fig. 11 은 경계층 박리 영역내의 유동을 조사하기 위하여 박리 유동 내에 열선을 수평면에 장치하고 위에서 찍은 것으로 박리유동이 크게 亂流함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 12 는 차앞 부분의 하단에 에어 댐 (air dam) 을 수평면에 50 度 각으로 장치하였을 때의 유선을 보여주고 있는데 이는 에어 댐

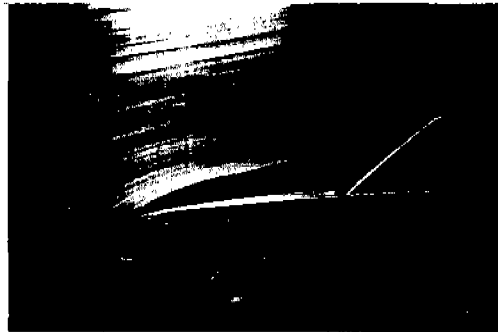


Fig. 10. Flow visualization around front part of car using smoke-wire technique.



Fig. 11. Smoke-wire visualization of flow in center of PONY 2 :  $U_{\infty} = 2m/s$ ;  $Re = 5 \times 10^4$

이 없을 때보다 박리가 크게 감소되었으며 앞부분에서 발생한 박리점이 다시 후드면에 도달함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 13, 14, 15는 각각 PONY 2의 기본형, 백 경사 수정, 리어 스포일러를 장치하였을 때의 后流(wake)를 보여주고 있

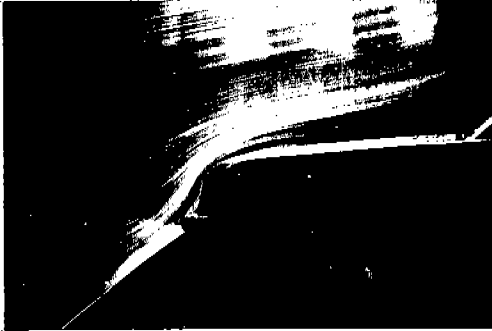


Fig. 12. Upper part of PONY2:  $U_\infty=2\text{m/s}$ ;  $Re=5 \times 10^4$ . The flow in side separated region is turbulent.

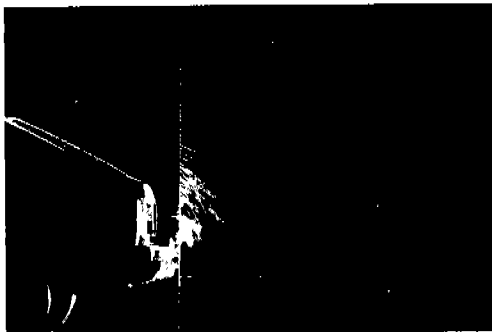


Fig. 13. Smoke-wire visualization of flow in center of PONY 2 with air dam (angle=50 degrees)



Fig. 14. Wake developed behind the original car.

다. 이 사진으로서는 후류와<sup>10)</sup> 항력과의 관계를 定量的으로 설명하기에 충분하지 못하여 더 자세한 연구가 요구된다.

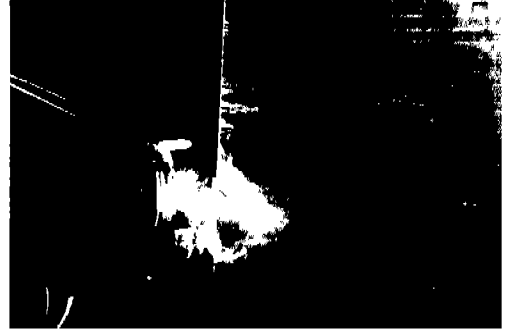


Fig. 15. Wake developed behind the car with rear spoiler

결론으로 車의 공기 저항은 주로 압력 저항을 줄임으로써 이룩된다. 리딩 에지 경사나 후드 경사의 변경에 의하여 부분적으로 흐름의 박리 영역을 감소시키거나 또는 지연시키어 부분적인 压力回復(pressure recovery)이 이루어져 압력 저항이 감소된다. 그리고 가이드 베인이나 리어 스포일러 장치의 첨가에 의하여 車의 후류 영역을 줄임으로써 저면 압력 저항(base pressure drag)이 감소되어 결국에는 압력 저항이 감소하게 된다. 구체적이고 定量的인 해석을 위하여는 부분적으로 자세한 압력 분포 측정이 요구되며 앞으로의 연구가 기대된다.

### 3. 결 론

우리 나라에서 제작한 대표적인 소형승용차 PONY 2에 대한 공기역학적 특성을 서울工大 풍동을 이용하여 조사하였다. 보정된 항력계수는 0.45로서 외국 소형 승용차의 것과 비교하여 별 차이가 없었다. 동시에 PONY 2 기본형에 AOA 장치와 부분적인 수정을 하였고 수정된 모델의 공기역학적 계수를 측정하였으며 그 중에서 리어 스포일러 장치를 하였을 때 최대 항력감소를 얻을 수 있었다. AOA 장치와 부분적으로 수정된 모델에 대한 항력계수 자료는 최소의 항력계수를 갖는 외형을 最適化하는데 이용될 수 있다.

後 記

本 研究는 1981년도 峨山社會福祉事業 財團의 지원으로 이루어졌다. 그리고 本 研究에 사용한 자동차의 모델은 現代自動車株式會社에서 제작하여 주었으며 現代自動車株式會社에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th Ed., Mc Graw-Hill, 1979.
2. Kelly, K. B. and Holcombe, H. J., "Aerodynamics for Body Engineers." *Automotive Aerodynamics* Published by The Society of Automotive Engineers, Inc., 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096, 1977.
3. Hucho, W. H, Janssen, L, J and Emmelmann, H. J, "The Optimization of Body Details - A method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles," *Automotive Aerodynamics*, 1977.
4. Turner, T. R., "Wind Tunnel Investigation of a 3/8 Scale Automobile Model Over a Moving-Belt Ground Plane," NASA TN D-4229, 1967.
5. Marte, J. E., "A Study of Automotive Aerodynamic Drag," DOT-TSC-OST-75-28, 1975.
6. Ono, M., "On The Representation of a Ground in the Wind Tunnel," *J. A. S.*, vol. 3, 1935.
7. Kim, K. H., "Aerodynamic Configuration of Passenger Car by Wind Tunnel Experiment." M. S. Thesis, College of Engineering, Seoul National University, 1982.
8. Gross, D. S. and Sekscienski, W. S. "Some Problems Concerning Wind Tunnel Testing of Automotive Vehicles," *Automotive Aerodynamics*, 1977.