

# 高級概念 自動車の 空氣力學設計

## Aerodynamic Design of Advanced Concept Car

鄭仁碩\* 金顯祐\*\*

In-Seuck Jeung, Hyun Woo Kim

### 1. 머릿말

70年代의 석유위기는 전세계적으로 자동차의 효율성 증대에 관심을 기울이게 하였고 그에 따라 자동차의 효율성을 증가시키는 많은 연구가 행하여져서 보다 더 앞선 개념(advanced concept)의 자동차들이 개발되었다. 이러한 개념들 중에서 가장 활발하게 연구가 진행된 분야들중 하나가 자동차의 공기저항의 감소를 꾀하는 공기역학적 개발(aerodynamic development)이다.<sup>1-3)</sup>

자동차에 있어서 공기저항의 감소는 자동차의 연료 경제성의 측면에서 가장 비용이 적게 소비되는 대책으로 인식되고 있다. 결과적으로 전세계의 각 자동차 생산회사에서는 그들이 생산하는 자동차의 공기역학적 특성들을 개선하기 위하여 노력하고 있다. Fig. 1에 최근에 미국에서 생산되는 자동차들의 항력계수의 경향을 보인다.<sup>4)</sup>

여기에서 보면 항력계수는 매우 빠른 속도로 감소되고 있으며 이는 차체표면의 최적가공기법(The Techniques of the Optimization of Body Surface Details)에 의해서 가능했다.<sup>2)</sup> 이 방법이 공기역학적 효율을 증가시키는데에 효과적인 것이긴 하지만 요구되는 효율성을 얻기 위해서는 다음과 같은 점에도

노력을 기울여야 한다.

- ① 전체 차체의 모양에 대한 공기역학적 특성 고려
- ② 후드(hood) 내부흐름, 냉각기, 바퀴주위

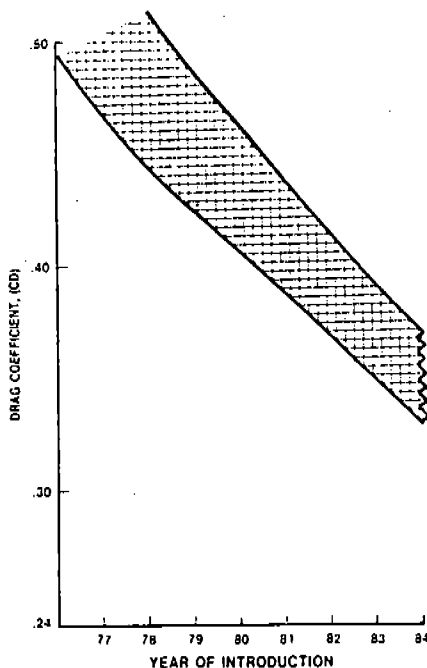


Fig. 1 Range of drag coefficients (CD) of typical American manufacturer's newly introduced production vehicles with all new exteriors.

\* 正會員, 서울大學校 航空工學科

\*\* 서울大學校 航空工學科

- 의 흐름 고려
- ③ 새로운 차체나 샤시구조공법 개발
- ④ 공기저항 특성을 최적화하는 차체자세조절 고려
- ⑤ 돌출물, 틈, 표면 거칠기 등에 따르는 저항감소방법 고려

본 해설에서는 공기저항을 감소하기 위하여 위에서 열거한 점들을 고려한 공기역학적인 연구를 행함으로써 항력계수를 0.153까지 낮게 한 Ford사의 프루우브Ⅳ 개발과 그 결과에 대하여 서술하고자 한다.<sup>4-6)</sup>

우선 일반적인 공기역학적 설계를 위한 연구에 대하여 서술하고 풍동실험을 반복한 결과로 보완된 부분에 대하여 설명한후 최종적인 차에 대한 풍동실험 결과를 서술하는 순서로 한다.

## 2. 일반적인 공기역학적 설계를 위한 연구

저항력계수의 승용차를 제작하기 위하여 차체모양변수(Body Shape Parameters), 내부흐름, 그리고 차체자세에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

### 2.1 Body Shape Parameters

우선 프루우브Ⅳ의 외양과 각 부분의 명칭

을 Fig 2에 나타낸다.

a. Backlight Studies: 차체변수들중 가장 중요한 것이 backlight와 deck(trunk)의 공기역학적 성질들이다. 가장 효율적인 backlight를 결정하기 위하여 Kammback, notchback, Squareback, 그리고 fastback type에 대하여 연구하였다.

Fig. 3~5에 대표적인 실험결과를 도시한다. 이러한 실험결과 프루우브Ⅳ에서는 backlight는 가능한한 수평이 되고 수평 deck면에 6~9inch 정도의 거리까지 접근하도록 하였다. 이런 backlight는 전형적인 Notchback type이 아니므로 Notchback과 fastback의 중간형태로 Semi-fastback type이라고 하였다.

Fig. 6에 각각의 backlight type에 대한 항력계수의 값들을 보인다. 여기에서 보면 Semi-fastback, Kammback, fastback, notchback 순서로 저항력계수를 얻을 수 있었음을 알 수 있다.

Semi-fastback type을 채택함에 따라 뒷좌석에 앉는 승객의 머리위치가 낮아져야 하므로 뒷좌석의 위치를 낮추었고 deck 모서리는 윗쪽으로 그리고 차체의 맨뒷부분까지 후퇴하게 되었다.

### b. Underbody/Chassis Studies

항력계수를 낮추기 위하여 차체의 밑부분

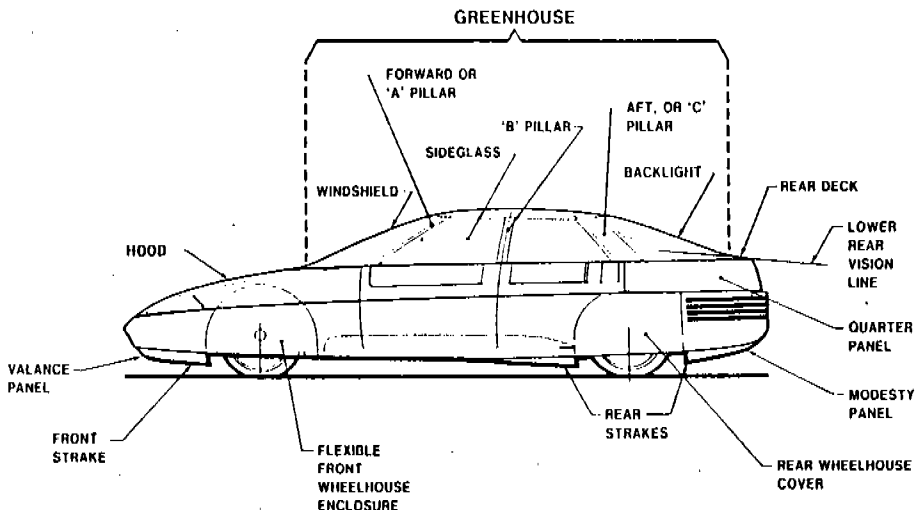


Fig. 2 Probe IV body surface nomenclature.

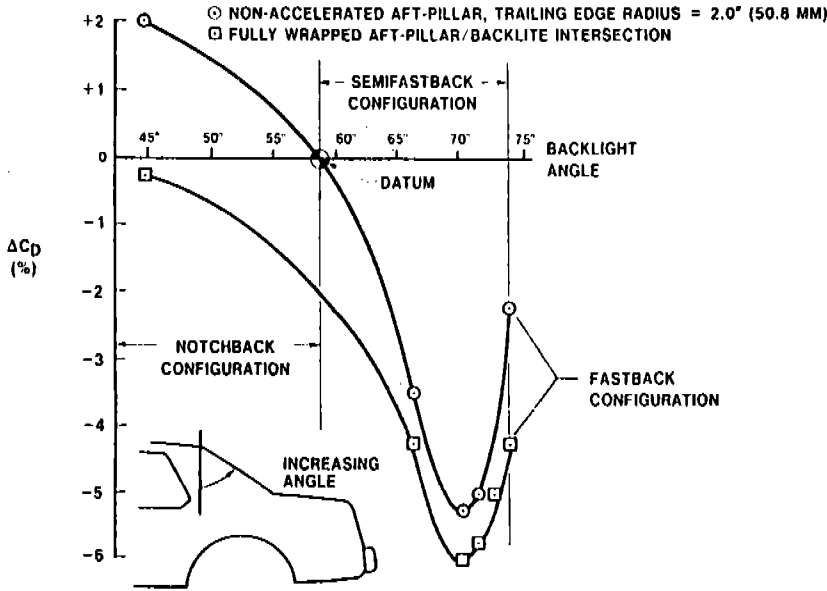


Fig. 3 Generalized effect of notchback/semi-fastback backlight angle on relative  $C_D$  levels for non-accelerated and accelerated backlight planview tapers,  $0^\circ$  yaw.

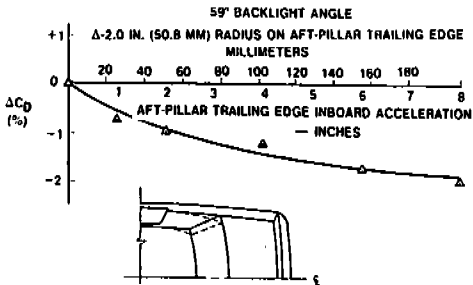


Fig. 4  $C_D$  vs. aft pillar planview inboard acceleration (inboard taper) for a typical semi-fastback configuration.

(Underbody)에 대한 연구가 수행되었다. 또한 앞 bumper 아래에 위치하는 Valance panel과 뒷 bumper 아래의 Modesty panel도 항력을 줄이는데 효과적이어서 이러한 연구결과로 포쿠우브Ⅳ는 Underbody 전체를 덮는 방법을 채택하였다.

c. Other Body Shape Studies

위에서 거론한 연구 외에 Windshield Angle and Wrap, Outside Mirror, Hood Slope와 Hood leading edge 위치, 바퀴 등에 관한 연구가 수행되었다.

2.2 내부흐름

자동차의 항력을 발생시키는 다른 인자는 radiator, air-con, condenser 그리고 Hood 내의 부품들을 냉각시키기 위한 차체 내부로의 공기의 흐름이다.

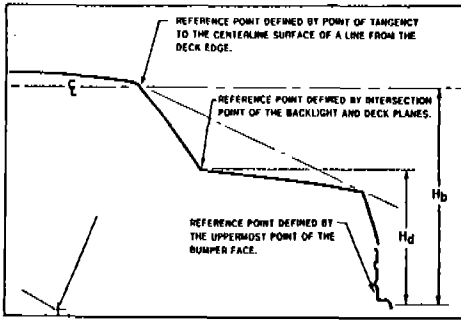
Fig. 7에 최근에 시험된 41종의 차에 있어서의 냉각용 공기의 흡입구를 열었을 때와 닫았을 때의 항력의 차이를 나타낸다.

항력을 최소로 하기 위해서 전면(前面)에 대한 흡입구의 투영면을 작게 하고, 흡입구의 위치를 변경함으로써 edge separation이 일어나지 않도록 공기흡입계를 설계하여 최소 항력계수 증가가 0.010~0.015가 되었다.

2.3 차체의 자세

차체 자세에 대한 많은 연구결과 차체의 앞부분이 낮춰지면 항력이 감소되며 0.5 inch의 증가가 매우 효과적임을 알 수 있었다.

차체에 대한 이상과 같은 공기역학적 실험 자료를 바탕으로 다음과 같은 초기의 공기역학적 설계 방향이 설정되었다.



DECK HEIGHT RATIO: (HR)

$$HR = \frac{h_d}{h_b} = \frac{\text{DECK LEADING EDGE HEIGHT ABOVE BUMPER}}{\text{BACKLIGHT HEADER HEIGHT ABOVE BUMPER}}$$

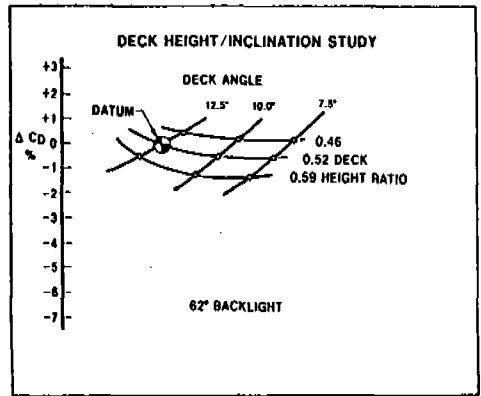
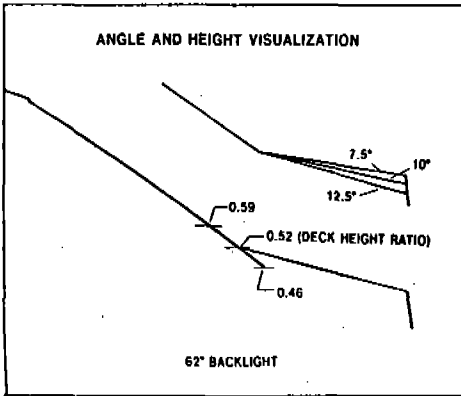


Fig. 5 CD as a function of deck angle and height for a typical 62° semi-fastback condition.

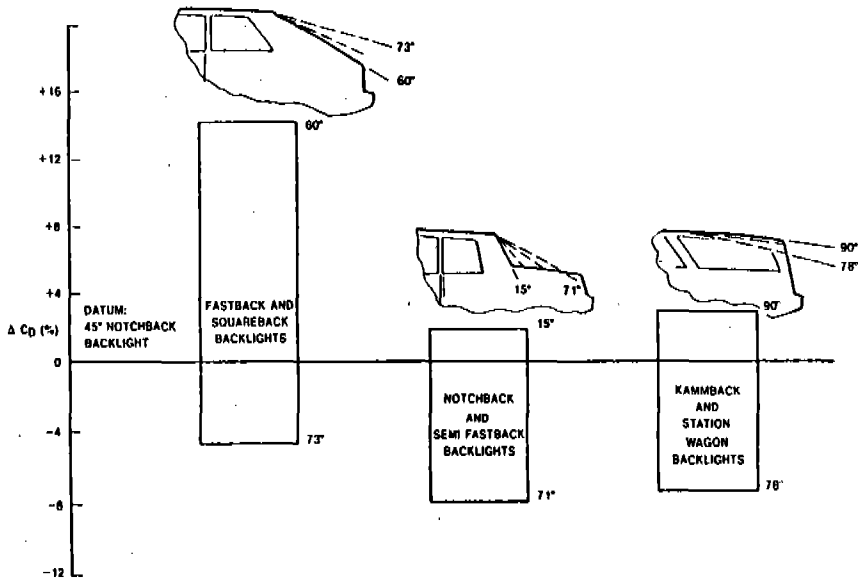


Fig. 6 Range of CD values for three basic backlight types, 0° yaw

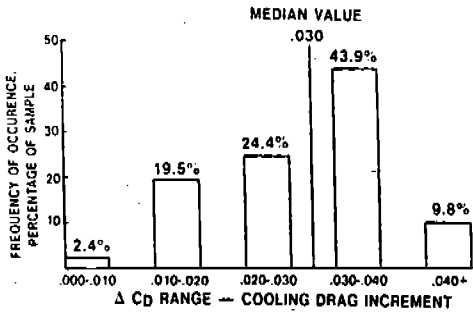


Fig. 7 Distribution of cooling drag increments for 41 current production vehicles.

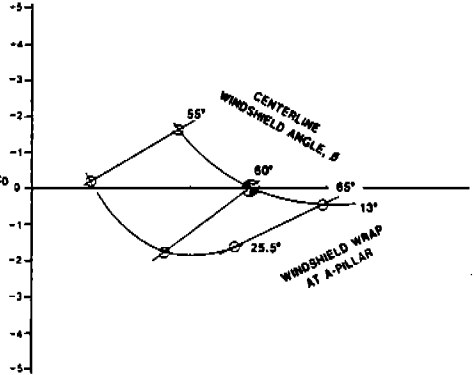
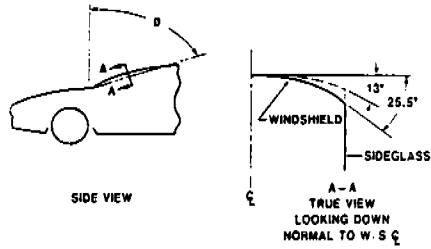


Fig. 8 Relative  $\Delta C_D$  vs. windshield angle and wrap for the flush windshield sideglass condition (internal pillars),  $0^\circ$  yaw.

- i) Windshield의 각과 Wrap은 최대로 한다.
- ii) 옆유리는 offset를 두지 않고 하나로 한다.
- iii) mirror의 형태를 최적화한다.
- iv) 최대각을 가지는 Semi-fastback backlight로 한다.
- v) 후드는 앞bumper의 윗모서리와 만나도록 아랫쪽으로 경사지게 하며 headlamp는 내장한다.
- vi) 목표로 하는 내부 용적을 보유할 수 있게 크게 한다.
- vii) Strake를 가지는 Wheel Skirt로 Wheel을 감싼다.
- viii) Underbody모두를 완전히 덮는다.
- ix) 냉각계는 차뒷쪽에 위치하도록 한다.
- x) 차체조절을 최적화할 수 있도록 컴퓨터를 사용하는 공기완충장치를 사용한다.
- xi) 타이어와 Wheel의 크기를 줄인다.

### 3. 공기역학 실험과 그에 따른 세부 개발 과정

여기에서는 위에서 서술한 초기설계 방향에서 언급되지 않는 세부 개발과정을 서술하기로 한다.

① Windshield Surface : Fig. 8에 큰 경사각과 최대 Wrap의 조합에 의하여 얻어진 최대 항력계수 이득을 보인다. 하지만 경사각과 Wrap은 빛의 투과성과 굴절효과에 의하여 제

한을 받는다. 그러므로 실제적인 최대 Windshield각은  $65^\circ$ 이며 이 경우 최대 Wrap은 Windshield와 Sideglass(옆유리)의 연결점에서의 표면경사각의 불연속성이 없도록 한 것이다.

② Sideglass Surface : Sideglass면을 하나의 면으로 하려는 계획(flush sideglass)은 internal structural glass support pillar를 설계함으로써 가능하게 되었고 이는 공기역학적으로 적합하다는 것이 실험결과 판명되었다.

③ Outside Mirrors : flush sideglass에 의하여 mirror의 위치, 모양, 크기 등이 영향을 받는다. Fig. 9에 특정한 mirror body fineness ratio에 대하여 최소항력조건이 존재함을 보인다. 실험을 통하여 최종적인 mirror 모양이 결정되었고 mirror에 의해 존재하게 되는 불이익이 최소가 되게 하였다.

④ Backlight and Deck Surfaces : semi-fastback backlight 각을 최대로 하고 deck 길이는 최소로 하여야 한다는 조건에 의해 backlight 각은  $71^\circ$ 로, deck 길이는 9 inch로 결정되었고 deck 모서리에 Kicker를 부착

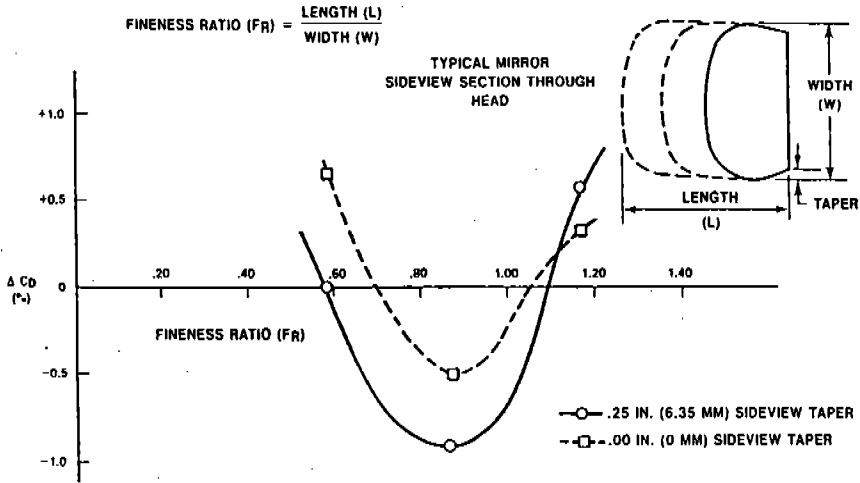


Fig. 9 Relative  $\Delta C_D$  vs. typical mirror head fineness ratio for flush sideglass condition.

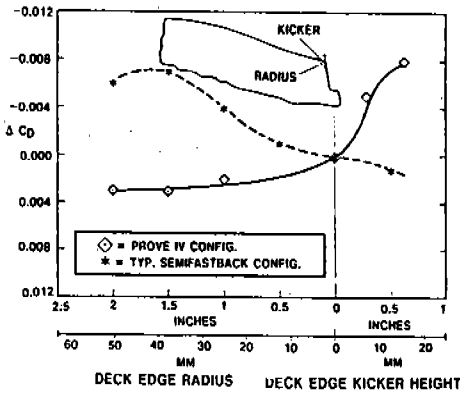


Fig. 10. Comparison of Probe IV vs. typical semi-fastback deck edge treatment drag level.

하였다. Fig.10에 deck 모서리의 곡률반경과 Kicker의 높이에 따른 항력계수의 변화를 보인다.

⑤ Headlamp Design : 최초 설계 단계에서는 곡선모양의 headlamp를 계획하였으나 크기, 무게, 복잡성 등을 고려하여 최종적으로는 고정된 내장 headlamp가 설계되었다.

⑥ Body Planview : 차체 측면에서의 유동의 부착에 관심이 집중되었으며 일단 부착된 흐름이 떨어지면 엔진, 변속기, tire clearance envelope 등이 차체를 결정하는 인자가 된다. 차체의 뒷부분은 적당하게 taper지고 곡률반경을 갖도록 하였으나 냉각계와 화물칸 용적

은 별로 영향을 받지 않게 하였다.

⑦ Wheel houses : 항력감소의 대부분은 Wheel house에서 기대할 수 있다. 이는 타이어나 현가장치 등 항력을 많이 발생시키는 부품의 사용을 피함으로써 가능하므로 다음과 같이 유동을 제어하는 제어면들이 필요하다.

a. Covered Wheel houses : 뒷바퀴의 house는 고정된 금속 cover인 반면에 앞바퀴의 house는 조항을 위하여 유연성이 있는 cover를 사용하였다. 이를 Fig. 11에 보인다.

앞바퀴의 고정된 안쪽 팬더(fender)는 선회시 유연성이 있는 바깥쪽면을 변형시키기 위하여 설계되었고 이것은 항상 앞바퀴를 덮게 하였다. 이러한 시스템은 보통의 경우보다 9%의 항력감소를 가져온다.

b. Wheel house Strakes : Fig.12에 Strake의 설치위치와 모양을 보인다. 실험결과 항력을 감소시키는 중요한 변수는 Strake의 투영면에 의해 덮어지는 타이어 전면(前面)의 백분율이다. 따라서 타이어 전면에 충돌하는 유동량이 최소가 되어 항력이 감소된다.

⑧ Underbody Surfaces : 차체의 Underbody는 front valance, main underbody, 그리고 rear modesty panel 이라는 세부분으로 나뉜다. 항력과 양력의 감소는 Underbody

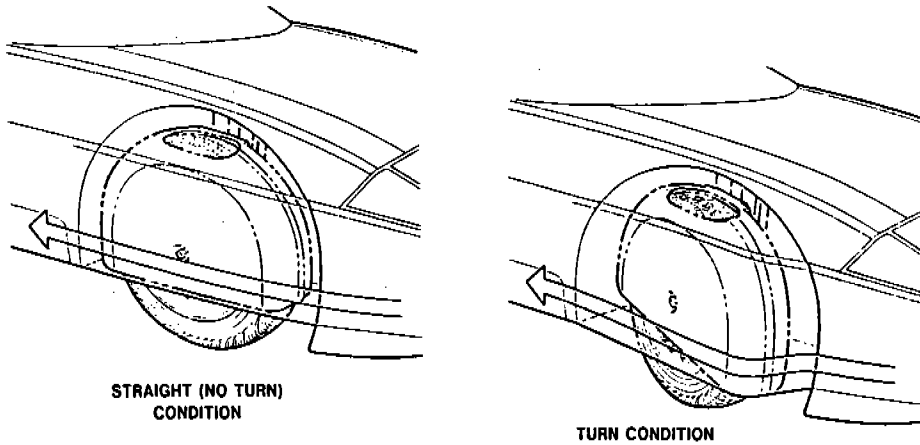


Fig. 11 Probe IV enclosed front wheelhouse system.

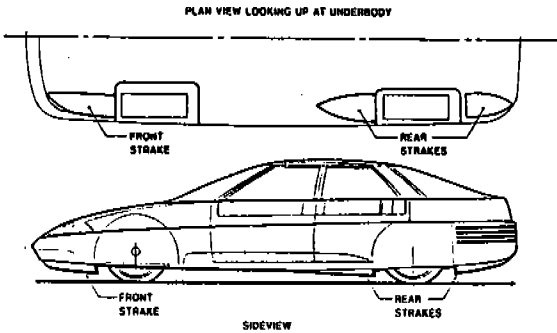


Fig. 12 Underbody strake location relative to forward and aft tire position.

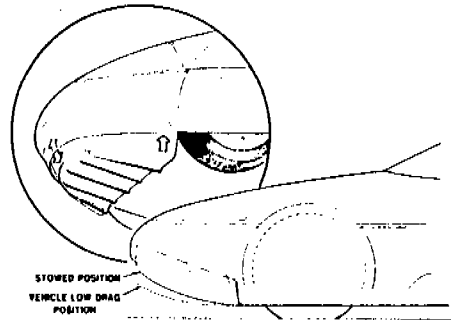


Fig. 13 Deployable front valance panel.

의 전면과 후면에서 가장 기대되며 따라서 개발의 중점은 front valance와 modesty panel에 두어졌다.

⑨ Front Valance : Front Valance는 움직일 수 있고 전개시킬 수 있는 특성을 갖도록 설계되었다. 저속일때 전개시켜서 curb clearance를 높으로써 ground clearance를 작게하여 항력을 감소시킬 수 있다. Valance가 Underbody에서 유동의 부착을 증진시켜야 한다는 목적에 따라 Valance의 前端에 곡률반경을 주었다. Fig. 13은 front valance의 상세도이다.

⑩ Rear Modesty Panel : modesty panel은 Underbody에서 유동의 박리를 지연시키기 위하여 알맞은 곡면을 갖도록 하였고 뒷차축 후부에서는 점차적으로 경사각에 변화를 주어 뒷bumper의 아래쪽 모서리와 만나게 하

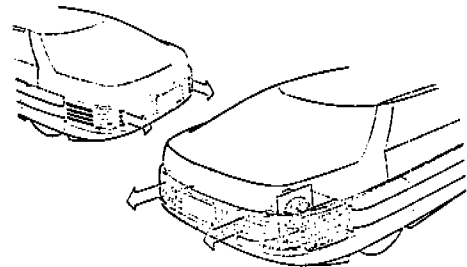


Fig. 14 Probe IV rear quarter panel cooling layout.

였다.

⑪ 냉각계 : 항력을 줄이기 위한 방법으로 흡입계는 차체의 옆면에 오게 하였으며 방열기와 콘덴서도 차의 뒷쪽에 분리시켰다. 냉각계의 유체는 차 뒤쪽에서 앞쪽의 엔진으로 underbody에 장착된 관을 통하여 이송된다. 이렇게 함으로써 엔진격실의 공기교환용 흡입

구를 제외한 대부분의 엔진격실은 차단하게 된다. 유입되는 공기량은 1.6liter, 직렬형 4 cylinder, 자동변속, 공냉식 엔진의 경우 한 면당 700cfm으로 하였다. 냉각계의 흡입과 배기는 차 뒷쪽의 유체의 흐름이 박리되지 않게 하거나 박리를 지연시키게 되도록 하였다.

㉓ 차체자세 조절계 : Fig.15에서 알 수 있듯이 항력계수와 차체의 자세는 밀접한 관계가 있다. 그러므로 내장된 센서를 이용하여 자동적으로 ground clearance를 속도에 따라 조절할 수는 시스템이 필요하다. 이 시스템과 연계하여 전개가능한 valance를 조절함으로써 가장 적절한 항력이득을 도모할 수 있었다.

현가율(Suspension Rate)는 속도에 따라 변화하며 다음의 세가지로 구분된다.

a. Static : 앞·뒤 차축에서의 ground clearance는 6.5inch, 차속은 0~10 mph

b. Transition : 앞·뒤 차축에서의 ground

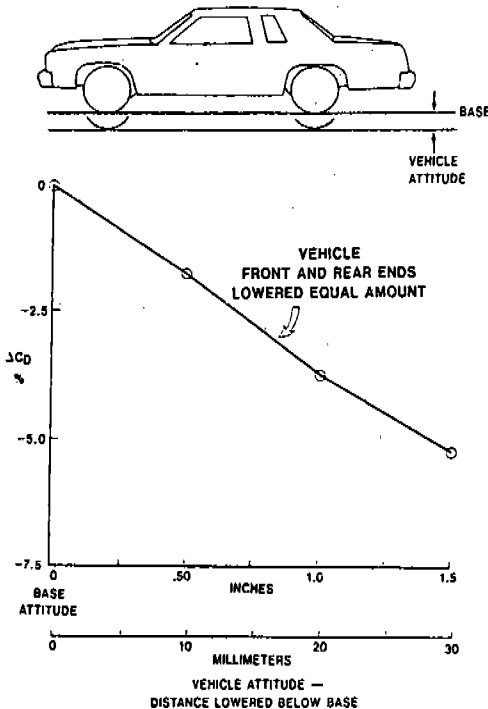


Fig. 15. Generalized trend of drag coefficient vs. reduction in vehicle road attitude for a typical production sedan.

clearance는 5.5inch, 차속은 11~40 mph

c. Dynamic : 앞 차축에서의 ground clearance는 3.25 inch, 뒤 차축에서의 ground clearance는 6.0 inch, front valance는 완전히 전개시키고 차속은 40 mph 이상

이상에서 열거한 항력과 양력에 관한 자료 이외에 Fig. 16과 같은 압력분포 자료는 underbody, backlight, rear deck 영역 등 차체 주위의 유동장을 이해하는데 많은 도움을 주었다.

#### 4. 풍동 실험결과

최종적인 Proto type에 대한 풍동실험은 Lockheed Tunnel에서 실시되었으며 측정된 자료들은 Continuity Blockage Correction Method에 의해 정리되었다.

##### ① Baseline 항력계수

Baseline 항력계수란 dynamic 조건에서 냉각팬을 가동시킨 상태에서의 항력계수이다.

Fig. 17에 차체 외양의 개발에 따라 항력계수의 추이를 보인다. Full size에 대한 실험결과 항력계수의 최종치는 0.153이다.

##### ② 속도와 측면풍에 대한 항력과 양력계수의 변화

Fig. 18과 Fig. 19에 속도와 측면풍에 대한 냉각팬을 구동시키지 않은 Baseline상태에서의 항력계수의 변화를 보인다. Fig. 18에서 보면 30~90 mph 사이에서 항력계수는 최대 1.85%의 변화를 보인다.

Fig. 20와 Fig. 21에 양력계수의 변화를 보인다. 속도에 따르는 양력계수의 변화는 50~90 mph에서 항력계수와 유사한 경향을 보이며 최대 10.5%의 변화를 보인다. Fig. 21에서 보면 Yaw angle ± 7.5°에서 최대 반양력(Negative lift)이 존재하며 이렇게 두개의 절점이 나타나는 현상은 Yaw angle의 증가에 따라 양력도 증가하는 보통의 자동차들에서는 볼 수 없는 현상으로 이는 rocker /valance strake의 존재로 말미암아 Wheel house와 Underbody 사이에서의 유동의 상호작용에 의한 것으로 생각되어진다. 또한 냉각팬을 가동



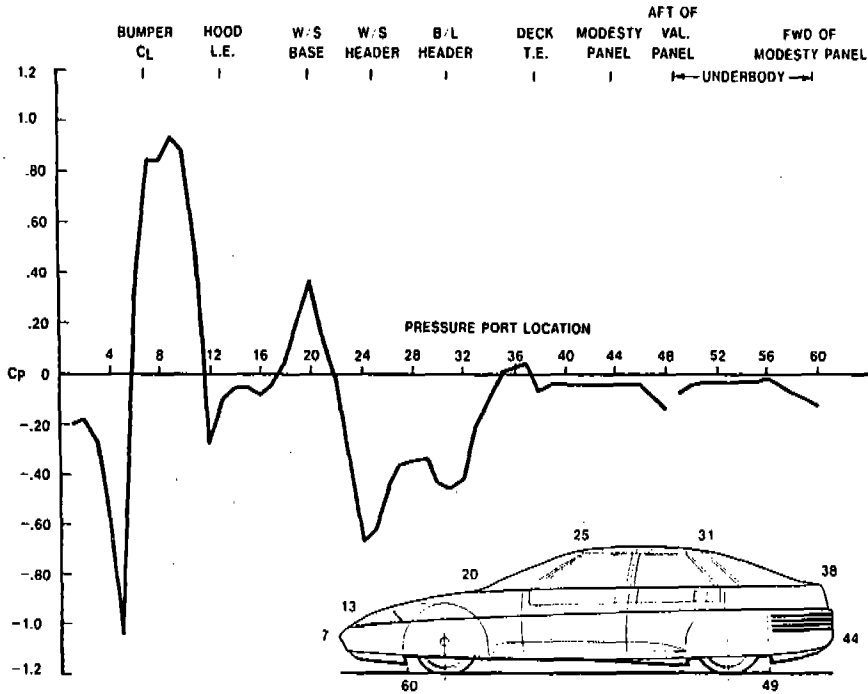


Fig. 16. Scale model centerline pressure distribution for early Probe IV theme, 0° yaw condition.

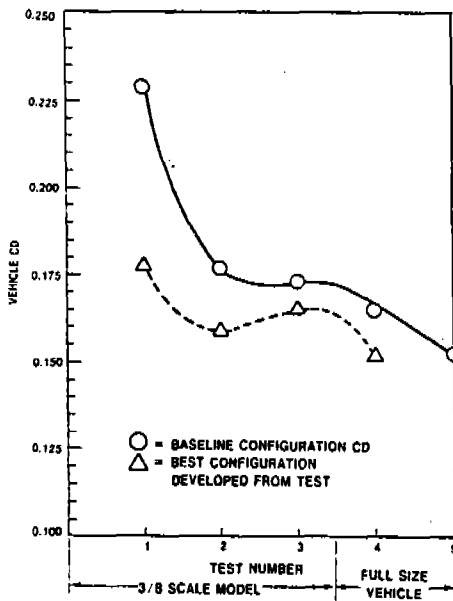


Fig. 17. Development of vehicle baseline  $C_D$  value over a five test sequence, 0° yaw condition.

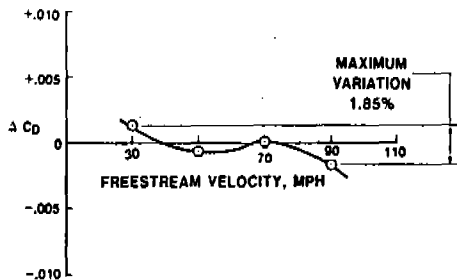


Fig. 18. Velocity variation effect on baseline prototype vehicle drag coefficient for 0° yaw angle, fans off.

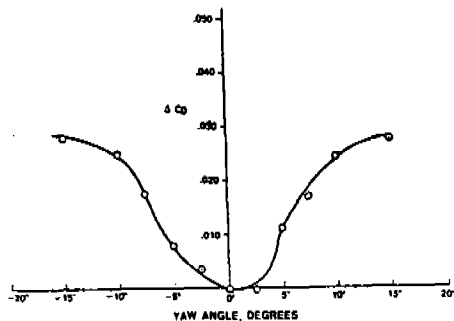


Fig. 19. Yaw angle variation vs.  $\Delta C_D$  effect for baseline prototype vehicle at constant velocity, fans off.

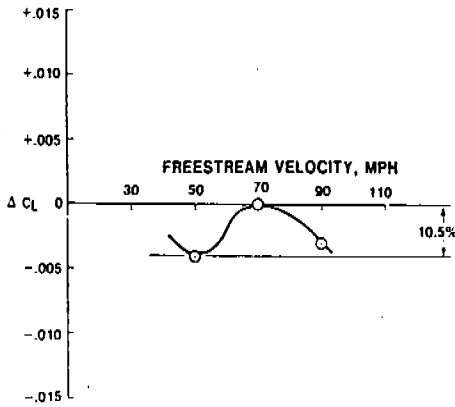


Fig. 20 Velocity variation effect on baseline prototype vehicle lift coefficient for 0° yaw angle and fans off.

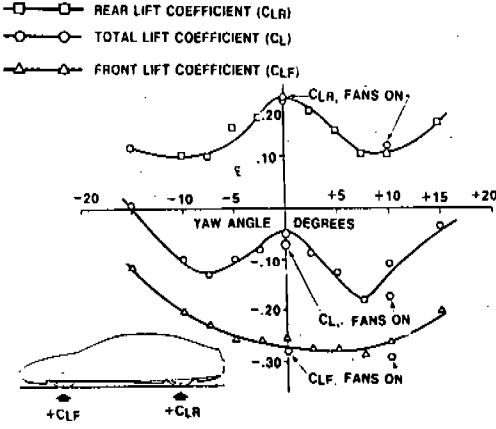


Fig. 21 Yaw angle variation vs.  $\Delta CL$  effect for baseline prototype vehicle with fans on, including  $\Delta CL_F$  and  $\Delta CL_R$  variations.

시킨 경우 양력이 약간 감소하는 경향도 보이고 있다.

③ 항력에 대한 냉각계의 영향

냉각계를 가동시킴으로써 차체측면 유동의 박리가 지연되므로 항력이 감소된다. Full size의 fiberglass차와 금속제차에 대한 항력 계수의 변화를 Table 1에 보인다.

④ 차체 안정성

차체의 안정성을 상대 비교할 수 있는 인자들중 하나가 압력중심의 위치이다. 이는 모멘트 중심과 압력중심 사이의 거리( $C_{YM}$ )의 차축간거리( $C_s$ ) 대한 백분율로 표시한다.

Table 1. Aerodynamic Drag Coefficient vs. Cooling System.

	$\Delta C_D$ Effect			
	Fiberglass Vehicle		Metal Vehicle	
	0°	10°	0°	10°
1. Base vehicle, intake fans off	Base		Base	
2. Base vehicle, intake fans on	-0.003	.000	-0.008	-0.011
3. Base vehicle, intakes covered (simulating model without cooling openings).	-0.006	-0.017	-0.011	-0.012
4. Total cooling drag penalty (difference of conditions 3 and 2)	+0.003	+0.017	+0.003	+0.001

$$X_{cp} = C_{YM} / C_s \times 100$$

무게중심과 압력중심사이의 거리가 가까울수록 측면풍에 의하여 발생하는 Adverse Yaw Moment가 감소되므로  $X_{cp}$ 가 무게중심에서 멀수록 안정하다. Fig. 22에 19종의 semi-fast back type 차들의  $X_{cp}$ 와 항력계수의 관계를 보인다. 보통 무게중심은 차축간 거리에 대하여 0~14%의 위치에 있다. 프루우브Ⅳ의 경우 10° Yaw에서  $X_{cp}$ 는 33.4%, 항력계수는 0.178이다.

⑤ Aerodynamic Horsepower

Aerodynamic Horsepower(AHP)는 전부 하 마력중에서 항력성분을 극복하는데 요구되는 마력으로 항력계수( $C_D$ ), 전면투영면적( $A_F$ ) 그리고 속도( $V$ )에 관계된다.

$$AHP = \frac{1}{2} \times \text{Density} \times C_D \times A_F \times \frac{V^3}{375}$$

Fig. 23에 4~5인승용 차들의 AHP 값을 보인다.

프로우브Ⅳ는 이들 차들의 AHP의 평균값보다 63.6% 개선되었다.

5. 맺는 말

지금까지 미국 Ford 자동차에서 개발한 프

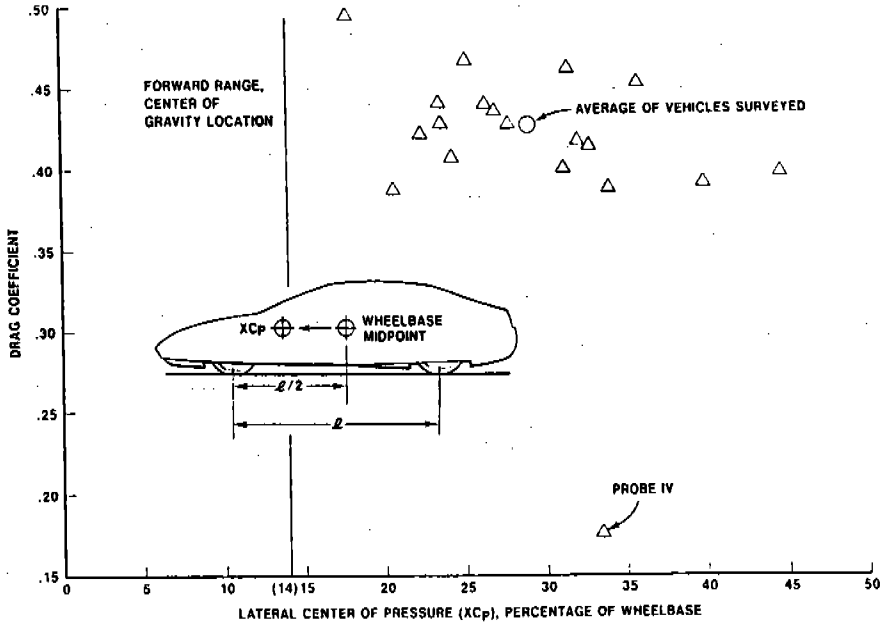


Fig. 22 Xcp ranking of 19 semi-fastback vehicles vs. CD level at 10° yaw wind condition.

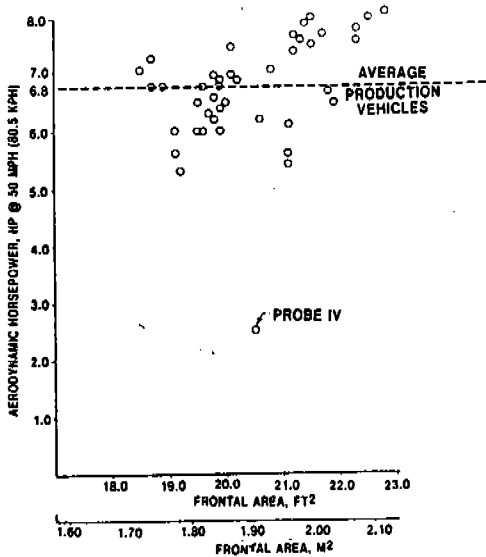


Fig. 23 Aerodynamic horsepower values vs. frontal area for 41 production vehicles and Probe IV.

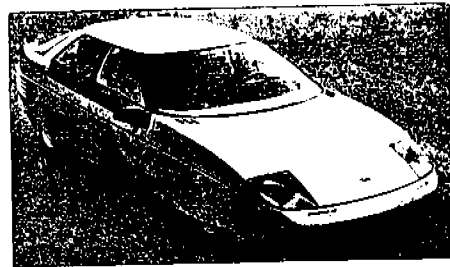


Fig. 24 Concept Car, Ford Probe

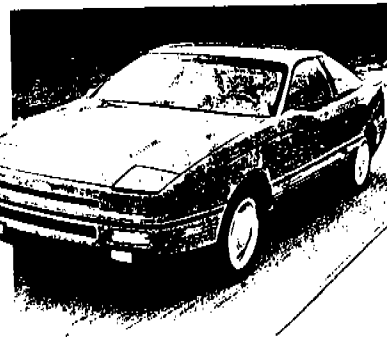


Fig. 25 Passenger Car, Ford Probe manufactured after the advanced concept car Probe Series

프루브Ⅳ의 설계개발과정을 중심으로 고급개년 자동차의 공기역학 설계과정을 살펴 보았다. 실제로 Ford는 그간 프루브 시리즈의 개념자동차를 1979년부터 I호, II호, III호를 개발하였는데 이들 개념자동차를 기초로 하여

개념자동차 II호의 결과로 Ford의 Tempo 와 Lincoln-Mercury의 Topaz 로 실용승용차를 제작하였으며 개념자동차 III호는 영국 Ford 에서 Sierra, 미국 Ford에서 Merkur XR4Ti 실용승용차로 제작되었다. 본호에서 설명한 개념자동차 IV호는 그 외형설계를 거의 그대로 유지하면서 개념자동차 V호로 계승되고 이때 공기저항계수  $C_D = 0.137$  까지 저하시킬 수 있었다. 이 개념자동차 V호의 설계에 따라 Ford Probe가 1988년 미국에서 실용차로서 선보였다. Ford 이외에도 GM그룹에서 개념자동차로서 개발한 Citation IV는 진흙모델의  $C_D = 0.14$ , 실물 개념자동차의 경우  $C_D = 0.18$  을 기록하였다.

자동차가 고속화되면서 자동차의 공기역학적 설계의 중요성이 한층 더 인식되고 있는 것이 일반적인 추세이고 이들 양사에서는 이상적인 목표  $C_D = 0.07$  을 향해 연구를 계속하고 있다. 국내에서도 자동차 3사에서 한국형 자동차의 개발뿐만 아니라 더욱 진보된 각종 공학기술의 도입이 요청된다.

Simulation-k-ε 亂流 model 에 의한 數值解의 比較例一,” 自動車工學會誌, 第 9 卷 第 3 號, pp. 36~45. 1987.

2. 姜信榮, 鄭石浩, 金晟薰, “自動車の 空氣力學,” 自動車工學會誌, 第 9 卷 第 3 號, pp. 46~54. 1987.
3. 鄭仁碩, 金顯祐, “自動車の 風洞實驗,” 自動車工學會誌, 第 10 卷 第 3 號, pp. 25~30. 1988.
4. R. M. Santer and M. E. Gleason, “The Aerodynamic Development of the Probe IV Advanced Concept Vehicle,” SAE Technical Paper #831000, 1983.
5. D. Sherman, “Going With the Wind,” Car and Driver, pp. 36~43. August 1984.
6. \_\_\_\_\_: “오늘의 차 -포드 프로브-” 自動車生活, 第 5 卷, 第 7 號(통권 47 號), p. 78. 1988.

參 考 文 獻

1. 李澤植, “自動車들의 流動의 數值

正 誤 表

本 學 會 誌 第 10 卷 4 號 的 解 說 “액체연료의 미립화와 분무특성”에 誤植이 있어 다음과 같이 訂正합니다.

訂 正 事 項

學會誌 卷, 號	쪽	줄	誤	正
10권 4호	16	아래로부터 ↑ 10	체적 $\frac{\pi}{6} x_{32}^2 = \frac{\pi}{6} x_1^2 \cdot \Delta N_1 + \frac{\pi}{6} x_2^3 \cdot \Delta N_2 + \dots$	체적 $\frac{\pi}{6} x_{32}^3 = \frac{\pi}{6} x_1^3 \cdot \Delta N_1 + \frac{\pi}{6} x_2^3 \cdot \Delta N_2 + \dots$
	16	↑ 9	$\bar{x}_{32} = \frac{\sum x_i^2 \Delta N_i}{\sum x_i^2 \Delta N_i}$	$\bar{x}_{32} = \frac{\sum x_i^3 \Delta N_i}{\sum x_i^2 \Delta N_i}$