

# 自動車の 空氣力學

## Automobile Aerodynamics

姜 信 榮\*, 鄭 石 浩\*, 金 晟 薰\*\*  
S. H. Kang, S. H. Chung, S. H. Kim

### 1. 序 言

自動車の 외형을 설계하는 과정에서 美的인 관점을 떠나 力學的으로 고려할 때에는 空氣力學이 매우 중요하게 된다. 이 분야에서 연구하는 專門家에게는 잘 알려진 내용이 될지는 모르겠으나 自動車の 設計 및 開發에 종사하는 一般研究者에게는 空氣力學의 基礎가 유용하리라 생각된다. 空氣力學에 관한 文獻 및 전문서적 또한 주위에서 쉽게 얻을 수는 있으나 부담없이 인식되기에는 그리 쉬운 일은 아니다.

이와 관련하여 Car Styling Volume 50<sup>1</sup>/<sub>2</sub>의 別冊으로 간행된 특집호에 여러가지 흥미 있는 내용이 기술 설명되어 있다.

이는 1985년 발행되었으며 日本自動車研究所에 재직중인 武藤眞理氏가 解説하였다. 이후 본 내용은 여기서 발췌함을 밝혀둔다.

自動車에 관한 空氣力學은 주로 다음과 같은 性能 向上을 위하여 必要하다.

- (1) 走行燃料費 節約
- (2) 最高速度의 向上
- (3) 高速走行時 操縱安定性의 向上
- (4) 橫風에서 走行安定性 向上
- (5) 엔진이나 제동장치 등의 冷却性能 向上

- (6) 바람에 의한 소음의 減少
- (7) 換氣性能의 向上
- (8) 除霜性能의 向上
- (9) 空氣調和性能의 向上
- (10) 먼지 또는 오물의 부착방지 및 抑制
- (11) 창문 와이퍼의 작동

등이다. 이러한 다양한 연구는 주로 風洞에서 이루어진다. 최근 각국의 주요 자동차 생산업체에서는 각자 大規模, 高性能 風洞을 獨自的으로 보유하는 傾向이다. 앞으로 大衆商品인 자동차의 시장에서 성공하기 위해서는 자동차의 공기역학적인 연구가 필수적으로 수행되어야겠다.

### 2. 自動車에 작용하는 힘과 모멘트

自動車가 정지해 있는 경우는 자중과 네 바퀴의 반력으로 평형상태가 유지되어 있으나 주행하는 경우 실제로 Fig.1과 같이 세방향의 힘과 모멘트를 받게 된다.

이들은 각각 다음과 같다.

$D$ : 抗力,  $S$ : 橫力,  $L$ : 揚力

$M_R$ : 橫搖모멘트,  $M_P$ : 縱搖모멘트

$M_Y$ : 偏搖모멘트

위 힘과 모멘트들은 자동차의 주행시 상대 바람에 의해 자동차의 표면에 발생하는 壓力

\* 正회원, 서울대학교 機械工學科

\*\* 서울대학교 大學院

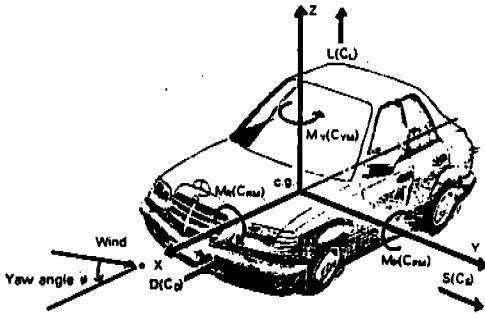


Fig.1 Six components of aerodynamic force

과 摩擦力에 의하여 발생한다. 고속 승용차의 경우 抗力, 揚力 및 縱搖모멘트가 가장 중요한 관심의 대상이 되겠다. 그러나 버스등 상대적으로 높이가 높은 자동차의 경우 다른 모멘트 성분도 중요하게 된다.

抗력을 나타내기 위해 보통 無次元係數  $C_D$  로 나타낸다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \times A}$$

여기서  $\frac{1}{2} \rho V^2$ 는 基準速度에 대한 動壓力이고  $A$ 는 보통 自動車의 前面投影面積으로 한다. 自動車가 정상주행을 하더라도 주위의 유동현상을 理論적으로 豫測하여 설계에 이용할 단계에는 도달하지 못하였다. 그러나 저항은 자동차 주위의 複雜한 3차원 유동 특히 여러 가지 剝離流動 및 渦動의 生成에 의하여 큰 영향을 받는다. 따라서 저항의 豫測은 주로 實驗에 依存하고 있다. Fig.2에는 여러가지 형태의 차량의  $C_D$ 를 參考로 比較하였다.

揚力은 비행기의 날개처럼 자동차 상면과 측면의 壓力分布에 의하여 발생한다. 그러나 비행체와는 달리 自動車의 경우에는 安定性を 고려하면 地面쪽을 向하는 負揚力이 요구된다. 저항과 마찬가지로 揚力係數  $C_L$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 \times A}$$

위에서와 같이 無次元係數를 使用하는 目的은 절대적인 量 자체보다도 서로 다른 물체의 空氣力學的 特性을 比較하기 용이함이다. 無

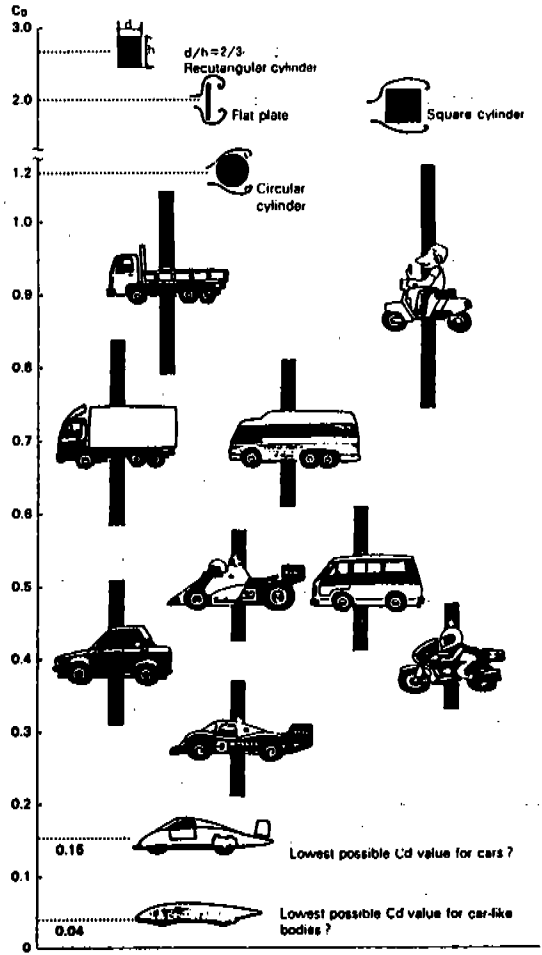


Fig.2 Drag coefficient( $C_d$ ) for cars and other 'bodies'

次元係數는 力學的 觀點에서 또 다른 無次元變수의 함수라고 생각한다. 그 예로  $C_D$ 나  $C_L$ 은 動力學的 相似變數인 Reynolds數  $Re$ 에 따라 변한다고 본다. 여기서,

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

로  $\mu$ 는 공기의 粘性係數이고  $V$ 와  $L$ 은 각각 대표적인 공기의 속도 및 자동차의 크기를 나타낸다.

### 3. 基本치수와 抵抗

車의 길이와 抵抗係數의 관계를 Fig.3에 나타내 보았다. 대체적으로 길이가 길수록 저항

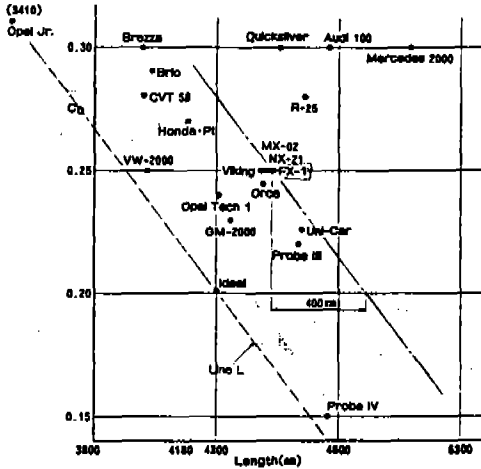


Fig.3 Correlation between  $C_n$  and length

계수는 감소한다. 저항이 아주 작은 차를 설계하기 위해서는 그림의 직선 L보다 오른쪽이 되어야 한다. 예를 들어 저항계수가 0.2가 되기 위해서 최소한 차의 길이는 4,300mm 이상 되어야 한다. 이는 현재 저항감소 기술에 근거를 둔 설명이다. 모델 FX-1의 경우 Uni-Car나 Probe III의 경우에 근거를 들때 길이를 400mm 증가시킨 형태로 개발한다면 저항계수를 0.2 정도까지 향상시킬 수 있으리라 짐작된다. 그림의 밑에는 1983년 일본산 승용차의 치수범위를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서는 대체적으로 車幅이 클수록 抵抗係數가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 앞서서와 같이 현재 技術現況으로 볼 때 車幅은 直線의 오른쪽이 되어야 한다. 예를 들어 NX-21의 경우 Probe III나 Uni-Car의 經驗을 토대로 본다면 차폭을 80mm 정도 키우면 저항계수를 0.2까지 줄일 수 있는 가능성이 높은 것이다.

車高는 높을수록  $C_D$ 는 증가하는 傾向을 보인다. 극소화된 저항차는 적어도 直線 왼쪽에 위치해야 되겠다. MX-02의 경우 현재 높이를 낮추어 1,340mm 정도로 하고 전체형상을 종합적으로 최적화시키면 저항계수가 0.21 정도까지 감소될 가능성이 높다. 저항계수가 0.2가 되기 위해서는 車高를 10mm 정도 낮

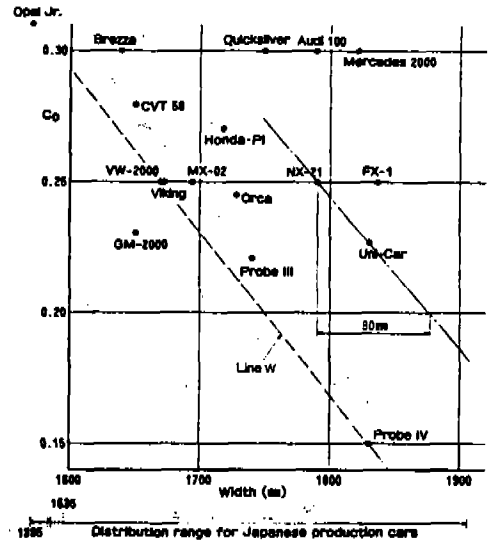


Fig.4 Correlation between  $C_D$  and W

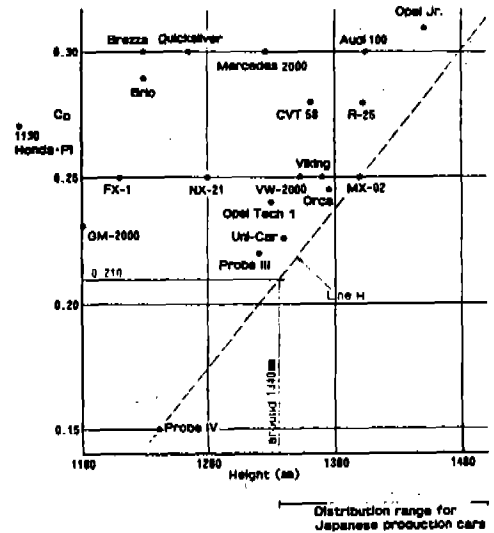


Fig.5 Correlation between  $C_D$  and Height

추어야 된다. 그러나 현재 시판되는 상태를 갖고 판단하면 저항계수는 0.21 이하로 낮추기가 어려우므로 새로운 차원의 시도가 필요 하겠다.

#### 4. 風洞과 試驗

空氣力學의 觀點에서 性能이 우수한 外形

을 개발하기 위하여 風洞試驗 및 관련된 연구가 점차 活潑해지고 있다. 風洞이란 실제로 자동차가 주행할 때 외기의 조건을 동일한 상태로 또는 力學的으로 相似한 조건이 되도록 하여주는 實驗裝置이다.

自動車用 風洞은 實車風洞과 模型風洞으로 나눌 수 있겠다. 實車風洞은 實物과 같은 크기의 모형을 실제 주행조건과 같은 조건에서 實驗이 可能하도록 제작된 風洞이다. 模型風洞은 실물이 縮小된 모형을 가능한 力學的으로 相似한 상태에서 實驗이 可能하도록 설계된 風洞이다.

測定부에 氣流의 溫度, 濕度를 임의로 변화시키기가 어렵기 때문에 空氣의 속도만 변화시킬 수 있는 경우 空氣力學 試驗用風洞이라고 한다. 測定部の 溫度, 濕度, 日射量 등 氣象條件을 임의로 변화시킬 수 있는 경우를 環境風洞이라고 한다. 測定部를 通過한 空氣가 재순환하여 다시 測定部로 유입되는 경우를 回流型風洞이라고 한다. 外部로 방출되는 경우를 開(open)타입 風洞이라고 한다. 回流型風洞은 설계가 다소 複雜하고 제작단가와 설치면적이 많이 소요되지만 상대적으로 送風機의 용량이 줄어들고, 운전비용이 절약되며 공기기류의 溫度나 濕度등을 제어하기가 용이하다. 回流型風洞의 대표적인 형태가 Göttingen 형 風洞이고, open형의 대표적인 예가 Eiffel 형 風洞이다. 이는 프랑스의 Eiffel 탑을 설계한 동일인에 의해 처음 설계되었다. 한편 測定部の 壁이 車體周圍에 많은 영향을 미친다. 왜냐하면 실제 자동차는 지면위를 달리지만 반무한 유체내를 주행하기 때문이다. 이에 따라 測定部가 네벽으로 제한되어 있느냐, 또는 격벽이 제거되고 完全히 제트형태로 氣流가 흐르느냐에 따라 형태가 分類되기도 한다. 前者를 closed-jet 또는 closed 風洞이라고 하고 後者를 open-jet 또는 open 風洞이라고 한다. 위 두 형태의 절충식도 있으며 semi-open-jet 또는 semi-open 風洞이라고 한다.

일반적으로 自動車用 風洞을 技術的으로 評價할 때 測定部에서 斷面積과 最大風速으로 나

타낸다. 이는 위 두가지 변수가 試驗될 수 있는 車種과 試驗項目를 결정하기 때문이다. 그러나 斷面積과 最大風速이 클수록 유지관리비 및 운전비용이 급증하기 때문에 經濟的인 側面도 고려해야 된다. Fig.6에는 현재 世界主要 自動車用 風洞의 단면적과 최대풍속에 의하여 分類한 결과를 나타내었다.

風洞에서는 주로 저항계수 등 공기역학적 힘과 모멘트를 정밀하게 計測하며 이를 위해 대부분 天秤을 이용한다. 그러나 같은 모형을 같은 方法에 의하여 試驗하더라도 풍동의 條件에 따라서 영향을 받기 때문에 試驗結果가 서로 다를 수 있다. 특히 저항계수에 영향을 주는 요소로써 隔壁의 영향, 測定部の 風速分布의 均一度, 바람의 亂流度, 測定部の 靜壓力勾配, 바닥에서 境界層 두께 등이 있겠다. 실제 주행상태와 상이한 이러한 영향을 어떻게 어느정도 보정해 주느냐가 풍동과 관련된 研究 및 기술이라고 하겠다. 이에 관해서 뒤에서 자세히 다루고자 한다. 실물 모형을 실물풍동에서 試驗하는 경우에도 위의 영향들을 주의깊게 다루어야 하며 이 외에도 자동차의 설치위

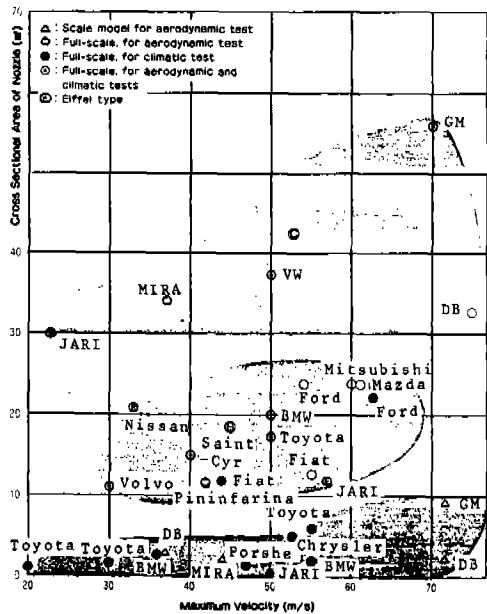


Fig.6 Major automotive wind tunnels in the world

치, 자동차 표면의 조도, 冷却과 換氣用 空氣 吸入量 등의 영향도 고려해야 한다.

앞서 言及한 空氣力學的 힘과 모멘트의 計測 및 국부유동 및 壓力의 計測外에도 실제 풍동에서는 여러가지 試驗이 이루어지고 있다. 엔진 冷却試驗은 엔진의 冷却에 필요한 空氣의 유입 및 토출, 冷却팬의 성능, 이들이 자동차 외형유동에 미치는 영향 등이 試驗된다. 와이퍼의 翹부 상태에 따라서도 그 운전특성 및 영향이 試驗된다. 한편 주행중 진흙, 먼지 등이 차체 및 유리창에 부착되는 상태도 매우 주요한 설계조건이 되겠다. 이물질은 차량의 자체적으로도 생기며 다른 주행중인 차량에 의해서 생길 수도 있다. 이들은 차체 주위의 空氣유동과 密接한 관계가 있으며 여러가지 방법의 유동가시화 試驗을 통해 設計資料를 얻게 된다. 空氣騒音試驗은 走行中인 차량주위의 空氣흐름에 의해 발생하는 音의 特性규명, 抑制 및 防止를 目的으로 연구한다. 고속 주행시 소음이 적어야 승차시 快適感을 느낄 수 있으며 안정성도 높게 된다. 騒音의 發生은 流動의 渦流와 密接한 관계가 있기 때문에 차량주위의 유동을 주의깊게 觀察해야 한다. 熱線流速計를 이용하여 渦流의 주파수 특성을 騒音計測과 함께 수행하여 연구한다. 快適性의 向上을 위해 車室內의 通風 및 換氣特性도 중요하다. 이를 위해 氣의 濃度 및 유량의 測定, 흐름의 觀察 등이 필요하다. 이와 함께 車室內의 溫度, 濕度의 調節에 대한 일반 空調試驗도 필요하다. 이 외에도 環境試驗, 熱害試驗, 氣密試驗, 室內空氣汚染試驗 등 여러가지의 試驗이 가능하다.

### 5. 小型乘用車의 空氣力學

小型乘用車의 形狀을 最適化하기 위해서는 전체형상과 국부적 형상을 동시에 잘 고려해야 된다. 종래에는 주로 車의 前面과 後面의 설계에 중점을 두었으나 側面部, 바닥 등 전체유동이 중요하게 된다.

前面 범퍼의 단면형상에 관하여 Fig.7에 나타내었는데 범퍼의 단면형상이 직사각형에 가

까울수록 범퍼의 전방에 정체영역이 크게 생긴다. 이를 줄여줌으로써 저항계수와 양력계수를 줄일 수 있다.

범퍼의 側面 형상도 Fig.8에서와 같이 중요하다. 범퍼의 형상을 둥글게 하고 側面 물드를 적절히 하여 渦流의 생성을 줄임으로써 저항을 감소시킬 수 있겠다.

Fig.9에는 Volkswagen Co.와 富士重工業의 경우로 범퍼의 위치와 Spoiler의 翹부에 따라 저항의 감소와 양력계수의 변화를 보여주고 있다. 실제로는 엔진 冷却을 위해 그릴로 유입되는 空氣量이 변하여 저항이 감소하는 양도 있고 直接的인 유동형태에 의해서 감

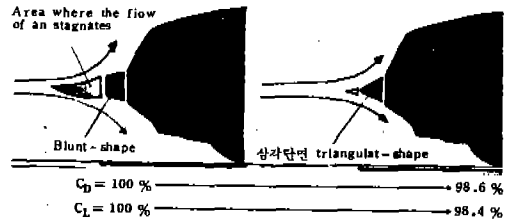


Fig.7 Shape of the bumper

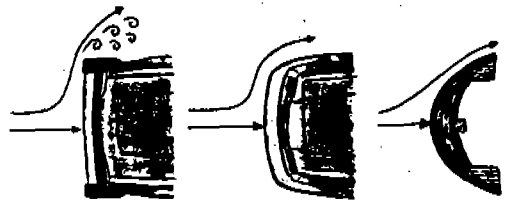


Fig.8 Optimization of bumper shape

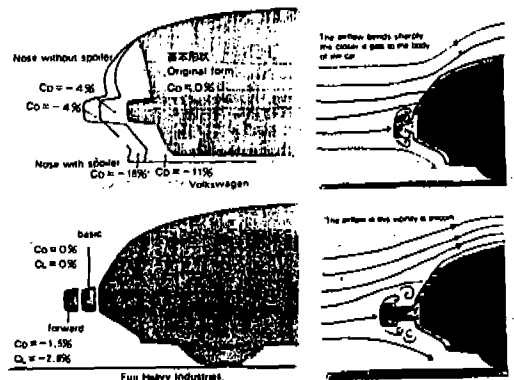


Fig.9 Bumper position

소하기도 한다. 저항성능면에서 양호하더라도 실용적인 차원에서 많은 制約이 있음도 사실이다.

자동차 前面下部에 에어댐을 설치하여 좋은 효과를 얻는 경우도 있다. 국부적으로는 에어댐에 의해 저항이 증가하겠으나 전체유동상태의 변화에 의해서 車全體의 抵抗은 減少될 수 있다. 따라서 차전체의 특성에 적합하도록 에어댐의 크기, 형상, 경사각 및 위치를 결정해야 한다.

Fig. 11의 資料는 VW Co.의 Brazil VW 1600X로 實驗한 것으로, 이 차에다 40mm 높이의 에어댐을 B위치에 설치하면 抗力を 감소시킬 수 있다.

揚力の 감소는 A의 위치에 50°의 경사각으로 120mm 높이의 에어댐을 설치하였을 때 가장 效果的이었다.

방풍유리의 각도는 유동의 흐름에 중요한 영향을 미친다. 미쓰비시자동차 연구부의 實驗資料에 의하면 이 각도가 30° 부근일때 가장 效果的으로 항력을 줄일 수 있음을 Fig.12에서 알 수 있다. 또 이 경사각은 후드와 그릴의 壓力分布에 지대한 영향을 주는 것을 알 수 있다.

뒷 유리 경사각( $\alpha$ )과 항력계수와의 관계를 G. M., V. W., JARI의 實驗結果로 나타낸 資料를 分析하여 Fig.14에 설명되어 있다.

- ①  $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$  -  $\alpha$ 가 증가함에 따라 보트 테일(Boat tail) 效果에 의해  $C_D$ 는 감소한다.
- ②  $10^\circ < \alpha \leq 28^\circ$  -  $\alpha$ 의 증가에 따라  $C_D$ 와  $C_L$ 도 증가한다. 그 이유는 車의 左右側面에서 나선형 渦動이 증가하기 때문이다.
- ③  $28^\circ < \alpha \leq 35^\circ$  -  $\alpha$ 가 30° 부근일때  $C_D$ 와  $C_L$ 은 최고이다. 그러나  $\alpha$ 가 증가함에 따라 급격한 감소를 나타내는데, 그것은  $\alpha$ 가 증가함에 따라 車의 후류에서 발생하는 2개의 나선형 소용돌이의 감소 때문이다.
- ④  $35^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  -  $\alpha$ 가 증가함에 따라  $C_D$ 와  $C_L$ 은 서서히 감소하는데 이것 또한

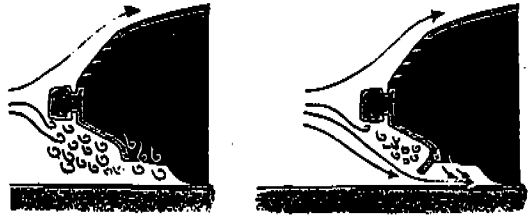


Fig.10 An effective air dam

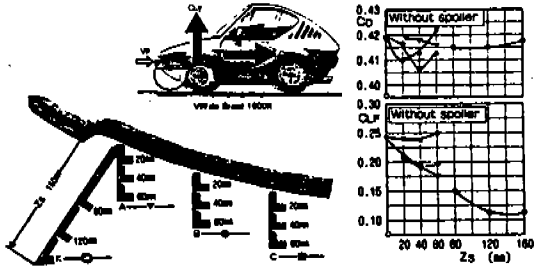


Fig.11 The height, position, angle of inclination of the air dam

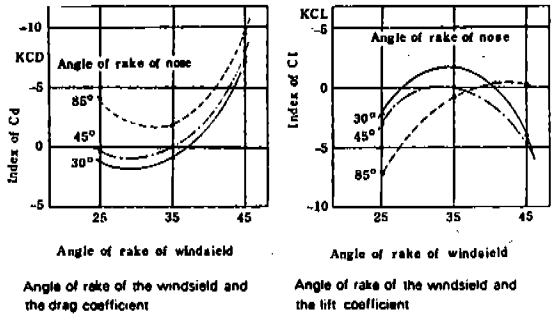
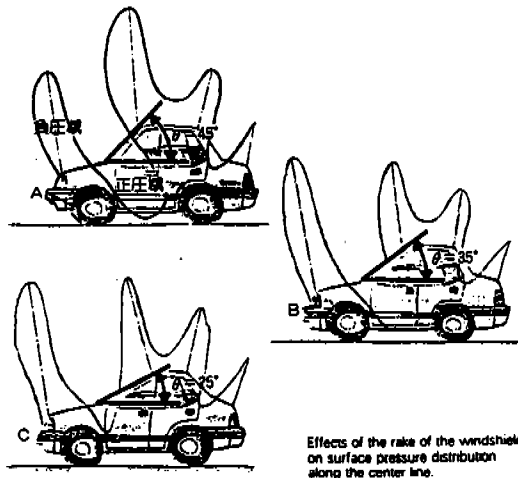


Fig.12 The rake of the windshield



Effects of the rake of the windshield on surface pressure distribution along the center line.

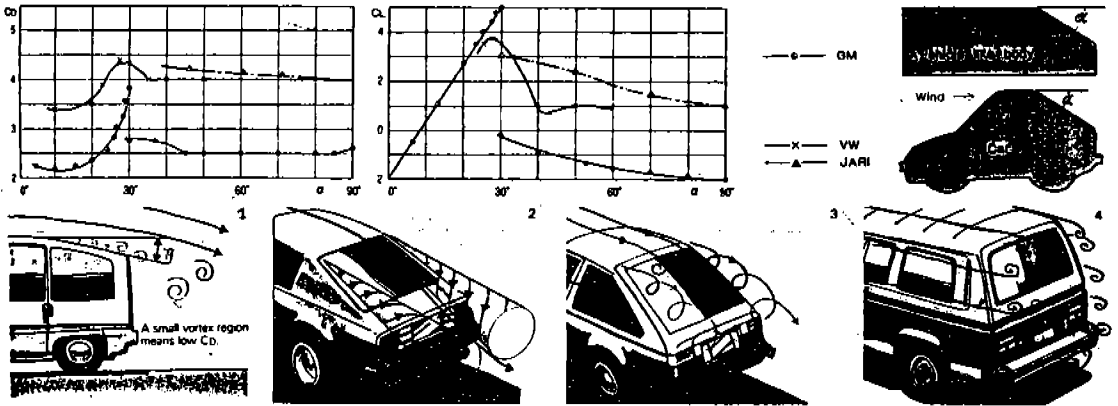


Fig. 13 The rake of rear window

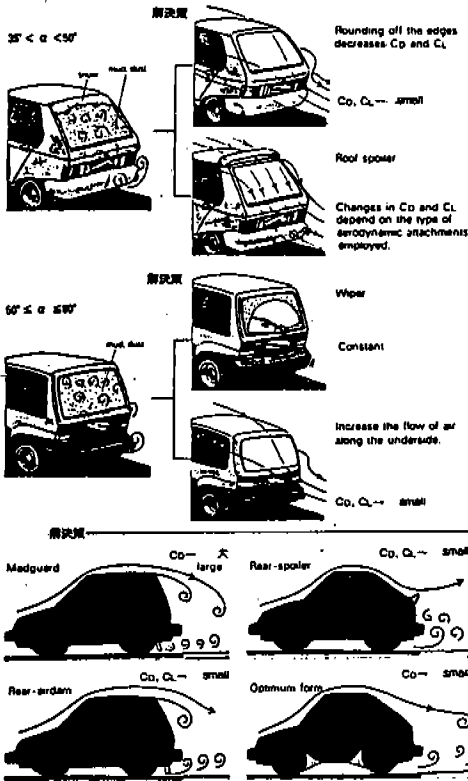


Fig. 14 The relation between rear window rake and dust

차의 후류에 발생하는 나선형 소용돌이의 감소로 인한 결과이다.

後流에 渦流가 형성되면 먼지나 오물이 뒷 유리창에 쉽게 부착된다. 뒷 유리 각도에 따

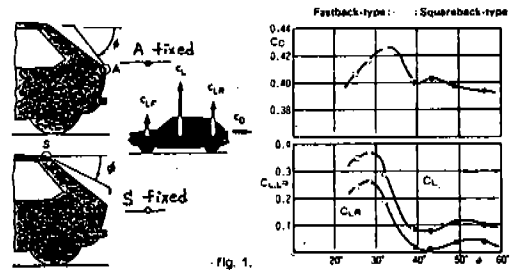


Fig. 1.

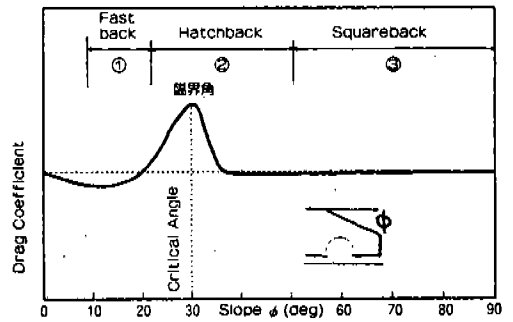


Fig. 15 The difference between a fastback and hatchback

라 먼지나 흙이 부착되는 量을 實驗한 資料를 Fig. 14에 나타내었다.

$\alpha \le 35^\circ$ 인 경우엔 약간의 먼지만 유착되지만  $\alpha \ge 35^\circ$ 인 경우에는 후방 와이퍼 (rear wiper)가 필요할 정도로 많은 양의 먼지가 유착된다. 이때 여러가지 解決策을 나타내었다.

Fig. 15에는 페스트백과 해치백 형태에 따른 空氣力學의 特性을 나타내었다. 두 형태

모두  $\phi$ 가  $20^\circ$ 일때 항력이 급격히 증가하여  $30^\circ$ 일때 임계각을 이룬다. 그리고  $40^\circ$ 부터 급격히 감소하여 일정한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 형태의 분류는, W. H. Hucho에 의하면  $C_D$ 가 일정하게 되는 선보다  $\phi$ 가 작으면 fastback, 크면 hatch back으로 구분하였다.

乘用車의 지붕의 형태는 渦流의 발생이라는 관점에서 매우 중요하다. 일반적으로 지붕은 완만하게 변하는 평면이지만 지붕의 모서리는 渦流의 생성을 가급적 抑制하도록 설계되어야 한다. 이는 후드의 형상, 앞유리창의 각도, 側面의 곡률 및 경사각 등을 동시에 고려하여야 한다. Fig.16에서와 같이 지붕의 뒷 모서리에 kick-up장치를 설치하면 뒷 유리창의 각도가  $30^\circ$  이상일 때  $C_D$ 와  $C_L$ 을 상당히 감소시킬 수 있다. 따라서 뒷쪽의 실내공간의 確保가 필요하며 kick-up장치를 부착하면 靜止 渦流가 형성되어 공기유동을 뒷유리 아래로 흐르게 한다. 따라서 상대적으로 낮은 저항계수를 나타낸다. 뒷쪽 스포일러(spoiler)로 效果가 크다.

Fig.17에는 日産自動車(株)의 資料를 나타내었고 後部 車體上面의 壓力分布의 變化를 보여주고 있다. 그림에서 스포일러의 높이를 증가시켜서  $C_D$ 와  $C_L$ 을 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

후방 공기 제동판이  $C_D$ 와  $C_L$ 을 줄일 수 있는 이유는 Fig.18에 나타낸다.

제동판 주위의 공기 유동이 그림과 같이 정체되므로 이 부근의 壓力을 높이는 역할을 한다. 즉 부압력이 정압력으로 바뀌는 것이다. 그러므로 이 정압력이 항력과 양력을 줄이는 역할을 하므로  $C_D$ 와  $C_L$ 이 감소된다.

후방 공기 제동판이 그 자체로서는 정압력을 일으키지만 크기가 너무 크면 항력을 증가시킨다. 그러므로 적은 소용돌이가 생성되는 높은 유동속도를 갖는 지역에 적당한 크기로 부착해야 한다.

후방 공기 제동판과 같은 效果를 얻을 수 있는 차체후부의 형상에 대한 方法이 Fig.19에 나타나 있다. 차체단면을 이용하여 공기의 흐

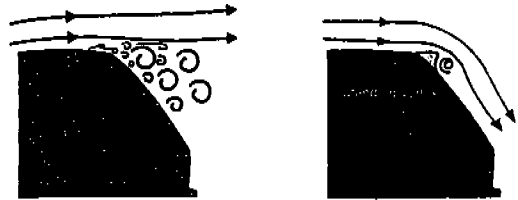


Fig.16 Effects of a rear kick-up

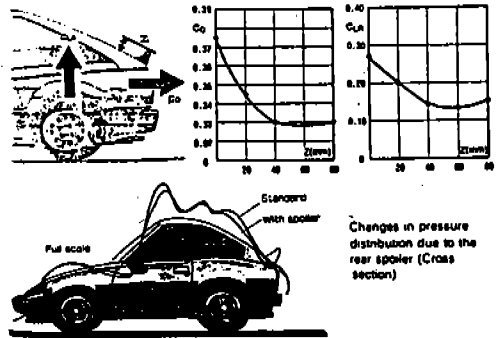


Fig.17 Effects of rear spoilers

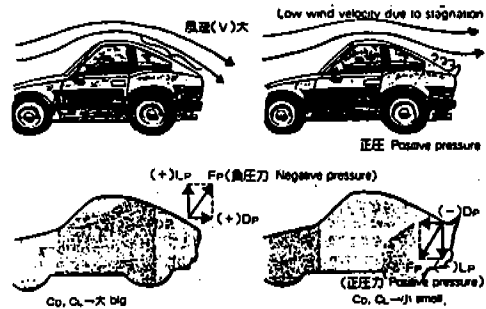


Fig.18 Rear spoiler reduce  $C_D$  &  $C_L$

름을 그림④의 경우에 분석하면, 회전 왕복운동을 하는 소용돌이가 스포일러를 경계로 두 개가 생기며 서로 간섭하지 않는다. 이 주위의 공기흐름은 폐쇄되고 낮은  $C_D$  값을 얻을 수 있다.

차체 아래 표면이 均一하고 매끄러우면 울퉁불퉁한 표면보다 渦流(vortex)의 형성을 제거하기가 쉽다는 것은 자명하다.

그러나 차체중 이러한 부분의 형상은 전·후의 에어덱과 엔진 冷却空氣의 흐름에 密接한 관계가 있으므로 반드시 평평하다고 하여 최



적인 것은 아니다. 그러므로 風洞에서의 反復 實驗을 통하여 결정되어야 한다.

많은 미래지향적 콘셉트(concept)차들이 [81 IAA(Frankfurt Show)]에 에어댐을 부착하고 등장하였다. 대부분 차의 형상은 'Fastback' 과 'Van' 이었다. 후방 에어댐을 부착한 차는 차의 밑에서 생기는 소용돌이를 막아주므로 차 표면위의 공기 흐름을 아래쪽으로 자연스럽게 흐르도록 해 준다. 이러한 裝置는 다른 어떤 수단으로도 더 이상  $C_D$ 와  $C_{LR}$ 을 줄일수 없는 차의 형상에만 效果가 있고, 'Notchback' 형태에는 전혀 效果를 미치지 못한다.

Fig.21은 空氣力學的으로 實驗된 Uni-Car 에 대하여 西獨의 4個 大學이 공동 연구하여 實驗한 資料이다. 이것에 의하면,  $C_{LR}$ 을 줄이려면 차체 아래의 후방이 윗쪽으로 曲線을 이루어야 한다. 이러한 형상이 되게 만드는 것을 [Hip-up] 장치라 한다. 그림에서  $\alpha^D$ 는  $3^\circ$  정도가 效果의이었다. 그러나 이러한 結果는 車에 따라서 다를 수 있음에 주의해야 한다.

6. 結 言

위에서 自動車 주위의 空氣力學的의 概念, 風洞 및 風洞試驗의 概略의인 설명을 다루고 小型乘用車에 관한 여러가지 문제들을 특별한 순서없이 설명하였다.

序篇에서 言及한 바와 같이 自動車의 空氣力學的의 概念에 의한 設計는 점차 중요해지고 있다. 따라서 자동차 주위의 전체유동, 局部的의 流動의 把握이 동시에 이루어져야 하며 이들의 觀察 및 研究를 위해서는 風洞의 利用이 불가피해진다. 이러한 추세하에서 본 소개기사가 이 分野의 從事者에게 다소나마 도움이 되기를 기대한다.

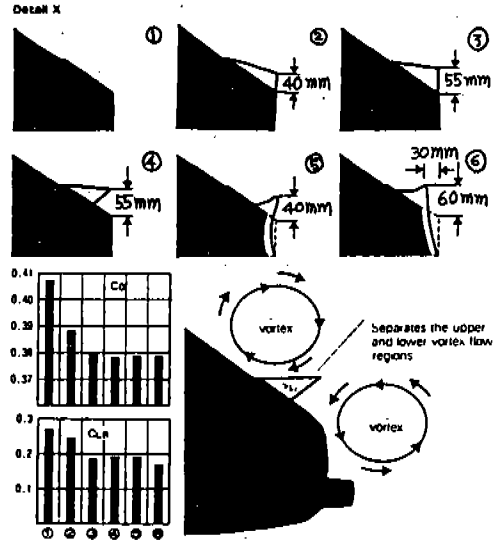
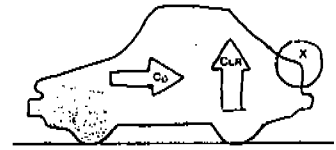


Fig.19 Some other models

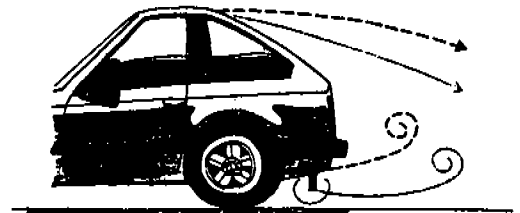


Fig.20 Effect of a rear air dam

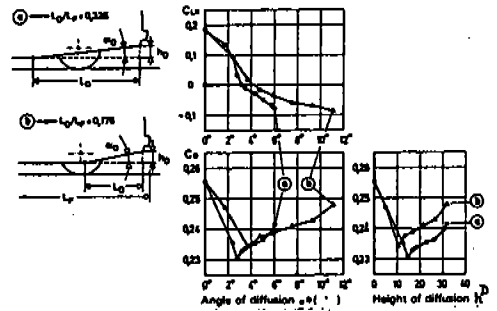


Fig.21 Effect of the Hip-up treatment