

노치-백 自動車の 空氣力學的 臨界 現象에 관한 實驗的 研究

An Experimental Study on Aerodynamic Critical Phenomenon of Notch-Back Car

裴 貴 男,* 朴 昇 吾**
G. N. Bae, S. O. Park

ABSTRACT

The aerodynamic critical phenomenon of notch-back type automobile-like bodies was investigated experimentally. The aerodynamic forces were measured for the various bodies of different back-light rake angle at $Re=0.8 \times 10^5$, 1.0×10^6 and 1.4×10^6 . Also, surface flow visualization was effected by the oil mixture. It was found that the critical phenomenon for the notch-back type bodies was milder than for the hatch-back type bodies; the drag vs. slant angle curve for the notch-back type bodies exhibiting local maximum was much smoother. Surface oil flow visualization revealed that the flow pattern associated with the critical phenomenon was characterized by the reattachment of the separated flow on the boot. The effect of the forebody on the critical phenomenon was seen to be negligible.

1. 序 論

自動車 주위의 空氣力學은 자동차의 操縱性能 및 安定性的 側面과 燃料節約的 側面에 기여하는 바가 적지 않으므로, 이에 관한 研究는 自動車の 外形設計에 중요한 影響을 미치게 된다. 本 研究는 특히 自動車 주위의 空氣力學에 나타나는 臨界現象에 주안점을 두었다. 여기서 臨界現象이란 Fig.1에 나타나 있는 것처럼 自動車 뒷 유리창의 傾斜角(γ)을 增加시킴에 따라 抵抗力이 敏感하게 變하여 特定傾斜角에서 最大抵抗力이 存在하는 現象을 말한다.

揚力の 경우도 비슷한 傾向을 나타낸다.⁽¹⁾

自動車の 臨界現象에 관한 研究는 Janssen과 Hucho가 自動車の 臨界現象을 實驗的으로 發見함으로써 시작되었다.⁽²⁾ 뒤이어 T. Morel은 경사진 뒷부분을 갖는 가느다란 軸對稱 실린더와 해치-백 自動車에 대하여 體系的인 實驗을 遂行함으로써, 基本的인 臨界現象의 特性을 밝혀냈다.^(1,2) 그리고 R. Sedney는 임계 현상을 理論的으로 說明하고자 渦流의 崩壞假說(Vortex Breakdown Hypothesis)을 提案하였다.⁽³⁾ 한편 臨界現象에 크게 影響을 끼친다고 생각되는 近接한 후류(Near wake)에 대한

* 한국 과학 기술원 기계공학부 연구원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과 항공전공

實驗的 研究가 계속 遂行되고 있다.^(4,5,6,7)

自動車의 臨界現象은 學問的으로 意味있는 研究對象일 뿐만 아니라, Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 C_D 의 差異가 傾斜角에 따라 最大 0.1 또는 0.2나 되므로 實際的으로도 自動車의 外形設計에 考慮되어야 하는 중요한 物理的 現象이다.

市販되는 自動車는 크게 해치-백 形態(Hatch-Back Type)와 노치-백 形態(Notch-Back Type)로 나뉘는데, 그 形狀의 差異로 인하여 自動車 주위의 空氣力學은 서로 다르게 나타난다. 그리고 現在 臨界現象에 관한 研究가 충분히 수행되지 못한 狀態이며, 실제에 適用하기 위해서는 實驗資料가 必要하다. 따라서 本 研究는 노치-백 形態의 自動車 주위 流動에서 생기는 臨界現象에 關하여 實驗的으로 研究하고자 하였다. 즉, 몇 가지 變數에 대하여 自動車에 作用하는 힘과 모우멘트를 測定하고, 기름을 사용한 表面 흐름의 可視化를 수행하여 臨界現象을 糾明하고자 하였다. 더불어 해치-백 自動車의 臨界現象과 比較하여 이들 自動車 주위의 空氣力學의 差異를 살펴보았다.

2. 實驗裝置 및 方法

2-1 實驗裝置

風洞의 試驗部에 설치된 實驗裝置의 모습을 Fig.2에 나타냈다. 實驗에 使用된 風洞은 Aerolab會社에서 製作한 開放形 亞音速 風洞으로 試驗部의 크기는 폭 1,016 mm, 높이 711 mm, 길이 1,524 mm이고, 試驗部 斷面의 速度分布는 0.25% 이하로 매우 均一하다. 그리고 亂流球(Turbulence Sphere)를 사용하여 測定한 風洞의 亂流係數는 1.39이고, 이것을 亂流強度로 환산하면 0.5% 정도이다.

自動車의 風洞實驗에서 地面板은 實際狀況을 시뮬레이션하는데 필요하며, 本 實驗에서 地面을 시뮬레이션하는 여러가지 技法중에서 간단한 固定地面板方法을 사용하였다. 地面板은 알루미늄합금으로 만들었으며, 이것의

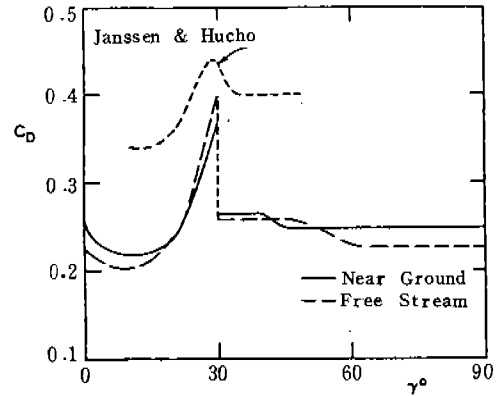


Fig. 1 Critical Phenomenon of Hatch-Back Car (Near Ground: $h/Deq = 0.12$, Free Stream: $h/Deq = 0.82$) [1].

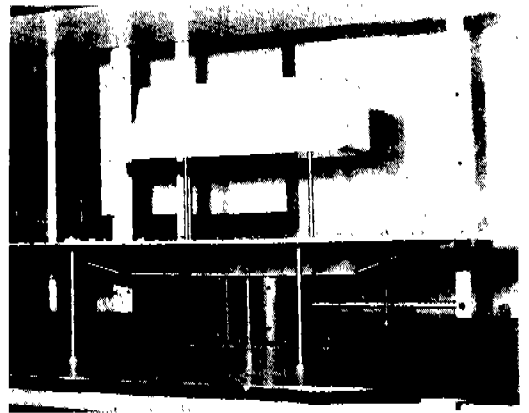


Fig. 2 Experimental Apparatus.

크기는 폭 920 mm, 길이 1,510 mm, 두께 6.4 mm 이고, 風洞의 바닥면으로부터 200 mm의 높이에 위치한다.

한편, 地面板 아래에 노출된 밸런스 와 모델을 연결하는 부분을 흐름과 격리시키기 위하여 翼型(나무와 아크릴로 製作)과 상자(방패와 비슷한 形態로 알루미늄板으로 製作)를 만들어 實驗에 사용하였다.

2-2 實驗모델

實驗에 使用된 모델을 Fig.3에 나타냈는데, 이것은 단순화된 노치-백 自動車이며, 製作 및 實驗上의 便宜를 위하여 모델을 앞부분과

뒷부분으로 나누어 만들었다. 앞부분은 앞부분 효과를 살피기 위하여 2개를 만들었으며, 뒷부분은 유리창의 傾斜角(β)에 따라 10° 간격으로 10개를 만들었고, 追加로 $\beta=45^\circ, 55^\circ$ 인 것을 만들었다.

모델은 自動車에서 실제로 중요한 内部空間을 一定하게 하고, 뒷부분의 傾斜面(S1)과 水平面(S2)의 길이($Ls1=Ls2=68mm$)를 一定하게 하여 만들었다. 이러한 拘束條件으로 인하여 뒷 유리창의 傾斜角(β)에 따라 모델 앞부분의 길이($l1$)와 아랫부분의 길이($l2$) 그리고 水平面의 높이($h1$)가 달라지게 된다.

모델은 加工하기 쉬운 아크릴로 만들었으며, 전체적인 폭은 $200mm$, 높이는 $136mm$ 그리고 公稱길이(Nominal Length)는 $450mm$ 이다. 그리고 모델은 밸런스와 연결된 지지대로부터 地面板 위로 나온 直徑 $10mm$ 인 2개의 棒으로 지지되고, 모델의 앞부분과 뒷부분의 連結部分은 보울트-너트로 前後 흐름에 影響이 없도록 투명 테이프를 붙였다.

2-3 測定裝置

風洞實驗 時에 모델이 받는 空氣力學的 힘과 모우멘트를 測定하기 위하여 Aerolab 會社의 Pyramidal Balance를 사용하였으며, 기타 測定裝置 및 資料處理圖는 Fig. 4에 나와 있다.

2-4 實驗條件 및 方法

모든 實驗은 모델의 偏向(Yaw)이 없는 狀態에서 3가지 레이놀드수(Re)에 대하여 실시하였다. 사용된 Re는 8.0×10^5 , 1.0×10^6 , 1.4×10^6 이고, 이것은 公稱길이를 基準으로 한 것이다. 그리고 實驗에 사용된 모델의 地面 隣接 程度는 $h/D_{eq}=0.12$, 0.82 인 경우를 擇하였다. 여기서 h 는 모델의 地面板으로 부터의 높이이고, D_{eq} 는 等價直徑으로서 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$D_{eq} = \sqrt{4A/\pi}, \quad A \text{는 모델의 최대단면적}$$

本 研究에서는 밸런스를 사용하는 힘 및 모우멘트의 測定과, 기름을 사용한 表面 흐름의

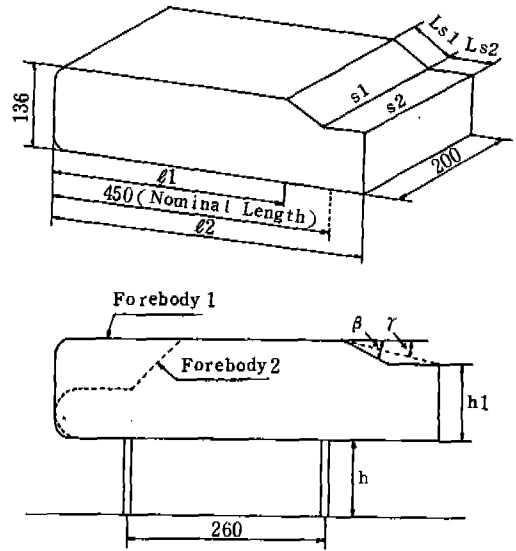


Fig. 3 Experimental Model ($\beta = 30^\circ$)

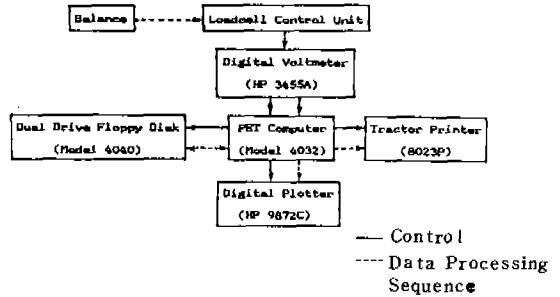


Fig. 4 Block Diagram of Data Acquisition System.

可視化의 두 가지 實驗을 수행하였다. 힘과 모우멘트의 測定은 노치-백 自動車의 基本特性($h/D_{eq}=0.82$), 앞부분의 效果, 實際 自動車 높이에서의 特性($h/D_{eq}=0.12$)에 대하여 실시하였다.

自動車 뒷부분의 流動形態를 살펴보기 위한 表面 흐름의 可視化는 自由流狀態($h/D_{eq}=0.82$)에서 앞부분 형상1 (Fig. 3 參照)인 모델에 대하여 실시하였다. 表面 흐름의 可視化에는 Paraffin Oil, Carbon Black, Oleic Acid의 混合物을 사용하였으며, 實驗結果를 風洞의 여건상 試驗部의 兩側面에서 撮影하였다.

2-5 資料處理

本實驗에서는 한 레이놀드수(Re)의實驗에 대하여 各成分마다 300번씩 값을 읽어 들여 이들의 平均, 標準偏差, 最大, 最小를 구하여 資料의 妥當性을 점검하고 平均을 대표값으로 택하였다.

모든 空力係數들의 基準點은 地面板 위에서 2개의 모델 지지봉 간의 中心點이다. 抗力係數(C_D)와 揚力係數(C_L)는 測定된 힘을 動壓과 모델의 最大斷面積으로 나눈 값이며, 피칭 모우멘트係數(C_m)는 測定된 모우멘트를 動壓, 모델의 最大斷面積, 公稱길이로 나눈 값이다. 그리고 양의 C_m 은 모델의 앞부분이 들리는 方向(Nose up)이다.

한편, 試驗部에 모델 등이 裝着되면 指示動壓과 實際動壓 사이에 差異가 생기는데, 이런 차이를 考慮해 주기 위하여 封鎖補正(Blockage Correction) 方法을 사용한다. 自動車와 같은 뽕뽕한 物體(Bluff Body)의 경우에 잘맞는 封鎖補正方法은 아직 알려져 있지 않으나 一次元의 連續方程式으로부터 誘導되는 M. I. R. A. 方法이 自動車에 비교적 널리 사용된다. 本實驗에서도 (1)式으로 表現되는 M. I. R. A.

方法을 택하였다.

$$q = \left(\frac{C}{C-A} \right)^2 \cdot q_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서 q_i 는 指示動壓, C 는 試驗部의 斷面的, A 는 모델, 地面板, 주변장치의 最大斷面積이다.

資料處理에 관한 詳細한 事項은 參考文獻(8)에 쓰여있다.

3. 實驗結果 및 分析

3-1 노치-백 自動車의 基本特性

먼저 앞부분 형상1인 모델에 대하여 地面板의 影響을 무시할 수 있는 自由流狀態($h/D_{eq}=0.82$)에서 노치-백 自動車의 基本特性을 살펴보았다. Fig. 5에 모델 뒷부분의 傾斜角(β)에 따른 空力係數들의 變化를 나타냈는데, 이것을 보면 空力係數들은 Re에 거의 影響을 받지 않으며, C_D, C_L 은 거의 동일한 傾斜角에서 最大값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이는 노치-백 自動車의 臨界現象을 보여 주고 있다.

노치-백 自動車와 해치-백 自動車 주위의 空氣力學에 관한 差異點을 理解하는 한 方法

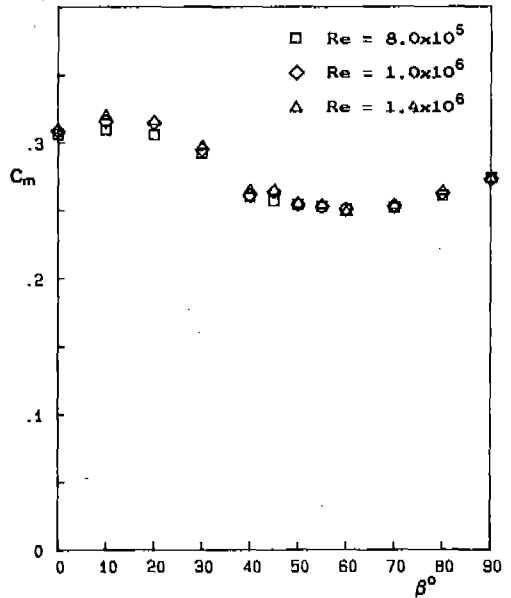
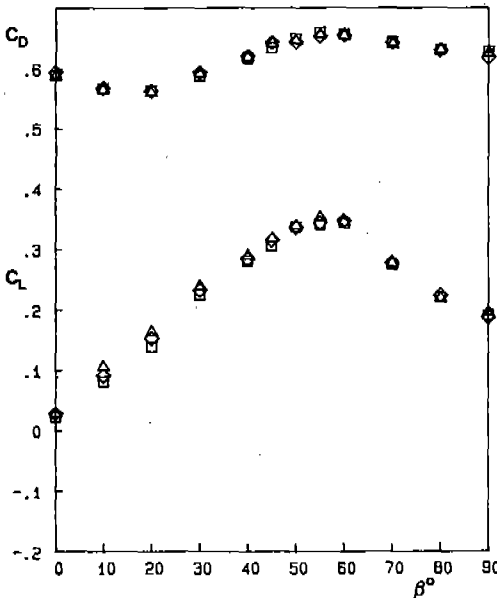


Fig. 5 Aerodynamic Coefficients of the Present Model ($h/D_{eq}=0.82$, Forebody 1).

으로 이들의 臨界現象에 관한 實驗結果(Fig.5, 參考文獻(1))를 比較하면 다음과 같다.

첫째, 해치-백 自動車의 경우에는 空力係數가 最大되는 傾斜角(臨界角) 근처에서 C_D , C_L 이 갑자기 크게 변하지만, 노치-백 自動車의 경우에는 C_D , C_L 의 變化가 비교적 완만하다. 이것은 臨界現象을 지배하는 自動車 뒷부분의 流動形態 혹은 剝離樣式이 다르기 때문이라고 생각된다. 즉, 해치-백 自動車의 경우에는 臨界現象을 지배하는 剝離樣式이 三次元 剝離樣式으로부터 臨界角 근처에서 類似 軸對稱 剝離樣式으로 바뀌지만(Fig. 6), 노치-백 自動車의 경우에는 뒷유리창의 上端에서 剝離된 흐름이 水平面(S2)에 再附着되는 剝離樣式에서 再附着되지 않는 剝離樣式으로 바뀌기 때문이라고 생각된다.⁽⁹⁾ 後者は 本研究에서 행한 表面 흐름의 可視化 結果로부터 어느 정도 確認할 수 있었다.

둘째, 해치-백 自動車의 경우에 臨界角은 $\gamma = 30^\circ$ 이나, 노치-백 自動車의 臨界角은 $\beta = 60^\circ$ 근처이다. 後者를 γ 로 表現하면 $\gamma = 30^\circ$ 근처가 된다. 여기서 β, γ 는 Fig.3에 定

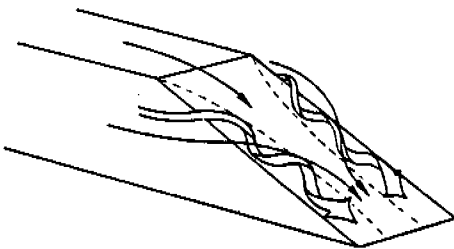
義된 대로 自動車 設計時에 중요한 幾何學的 角들이다. γ 로 表現되는 臨界角이 서로 一致하는 것은 自動車의 臨界現象에 傾斜角 γ 가 중요한 影響을 미치고 있음을 의미한다.

셋째, 배꼬리 모양 效果(Boat-Tail Effect)로 인하여 C_D 에는 局部的인 最小가 나타나는데 이런 效果가 노치-백 自動車에서는 $\beta = 20^\circ$ 근처에서 나타나고, 해치-백 自動車에서는 $\gamma = 9^\circ$ 에서 생긴다. 노치-백 自動車에서 $\beta = 20^\circ$ 는 $\gamma = 10^\circ$ 에 該當하므로 서로 비슷한 傾斜角에서 배꼬리 모양 效果가 나타남을 알 수 있다.

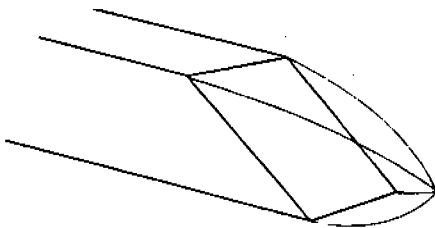
한편, Fig.5에서 C_m 의 變化를 보면 C_m 도 C_D, C_L 이 最大값을 갖는 傾斜角에서 局部的인 最小가 存在하는 경향을 나타낸다. 이것은 自動車에서 중요한 安定性 問題가 臨界現象과 密接히 關聯되어 있음을 의미한다. 그런데 C_D, C_L 의 傾向과는 相反되게 C_m 은 傾斜角(β)을 增加시킴에 따라 減少하다가 臨界角 보다 큰 β 에서는 增加하는 경향을 보인다. 이것은 傾斜角에 따라 노치-백 自動車 뒷부분의 傾斜面(S1)과 水平面(S2) 사이에 存在할 수 있는 剝離氣泡(Separation Bubble)의 生成 및 消滅 그리고 氣泡의 크기와 關聯이 있다고 생각된다. 즉 傾斜角(β)이 어느 정도 커짐에 따라 剝離氣泡가 生成되며, 이것의 크기는 臨界 傾斜角까지 增加하는데, 이때 뒷부분의 윗면(S1, S2)과 아랫면 사이의 壓力差가 增加하여 C_m 이 減少하게 된다.

3-2 앞부분 效果

노치-백 自動車에서 앞부분의 모양이 臨界現象에 끼치는 影響을 살펴보기 위하여 앞부분의 모양을 앞부분 형상2[Fig.3참조]로 바꾸어 $h/Deq = 0.82$ 인 條件에서 뒷유리창의 傾斜角(β)을 變化시키는 實驗을 하였다. Fig.7에 實驗結果를 앞부분 형상1인 경우와 比較하여 나타냈는데, 空力係數들이 앞부분 형상2인 경우에도 앞부분 형상1인 경우와 類似한 傾向을 나타낸다. 단지 앞부분의 모양의 差異로 인하여 空力係數들의 값이 전체적으로 약



(a) 3-D Separation Pattern



(b) Quasi-axisymmetric Separation Pattern

Fig. 6 Two Types of Separated Flow Patterns on Hatch-Back Car[1].

간씩 수직이동할 뿐이었다. 즉, 앞부분 형상2가 앞부분 형상1 보다 모양이 매끄럽기 때문에 C_D , C_L 에서는 0.1정도, C_m 에서도 0.2 정도 작은 값을 갖게된다. 또한 局部的인 最大값을 갖는 臨界角도 앞부분 형상1과 거의 一致함을 알 수 있다. 이상의 比較로부터 自動車の 臨界現象에 앞부분은 거의 影響을 끼치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3-3 實際 自動車 높이에서의 特性

自由流狀態에서 얻은 自動車の 實驗結果는 三次元의 冪冪한 物體의 流動特性으로 看做할 수 있으며, 이것과 지면에 인접한 자동차의 流動特性 간의 差異點을 살펴보는 것도 중요하다. 本 實驗모델의 경우에 $h/Deq = 0.12$ 인 狀態는 實際 自動車가 地面으로부터 떨어져 있는 程度와 거의 같으므로^(1,2) 이 條件(앞부분 형상 1, $h/Deq = 0.12$)에서 뒷유리창의 傾斜角(β)을 변화시키면서 空力係數들을 測定하는 실험을 遂行하였다. 실험결과를 Fig. 5와 比較하여 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 8을 보면, 空力係數들이 대체적으로 自由流狀態에서 나타나는 傾向과 비슷한 경향을 보이며, 자유류상태 보다 C_L 과 C_m 은 각각

0.1, 0.15 정도 작은값을 가지며, C_D 는 서로 비슷하다. 이것은 C_D 는 地面에 別로 影響을 받지 않지만, C_L 과 C_m 은 상당히 敏感하게 地面에 影響을 받는다는 것을 意味한다. 이와같은 結果는 海치-백 自動車에서 얻은 結果와 類似하다. 地面의 隣接程度에 거의 무관하게 臨界現象의 傾向이 유지되는 것으로 미루어 보아 三次元의 冪冪한 物體에 대한 研究는 實際 自動車 주위의 流動現象을 料明하는데 유용하리라고 생각된다.

3-4 表面 흐름의 可視化

노치-백 自動車에 대한 힘과 모우멘트의 測定結果에 나타나는 臨界現象이 自動車の 뒷부분에서 생기는 流動의 剝離樣式과 관련되어 있다고 알려져 있으므로^(1,2,9) 이것을 表面 흐름의 可視化를 수행함으로써 관찰하였다. 흐름의 可視化 實驗은 $Re = 8.0 \times 10^5$ 인 條件에서 노치-백 自動車 뒷유리창의 傾斜角(β)을 變化시키면서 기름을 사용하여 실시하였다.

臨界現象과 관련된 두 領域의 대표적인 傾斜角에 대한 可視化 結果를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 9는 $\beta = 50^\circ$ 인 경우로 이때의 流動狀態는 다음과 같다. 傾斜面의 上端

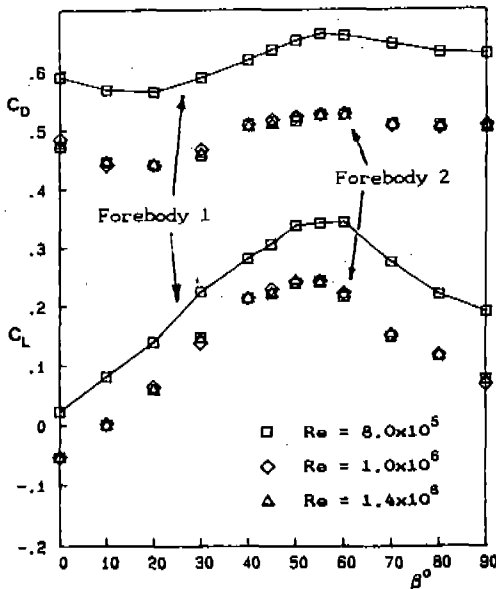
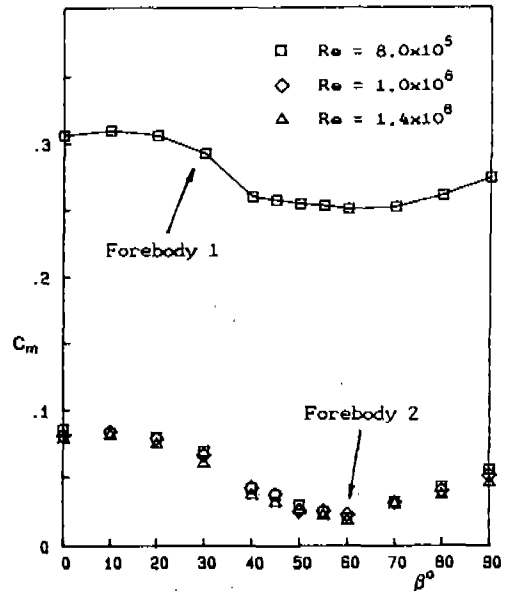


Fig. 7 Effect of Forebody on the Aerodynamic Coefficients($h/Deq=0.82$)



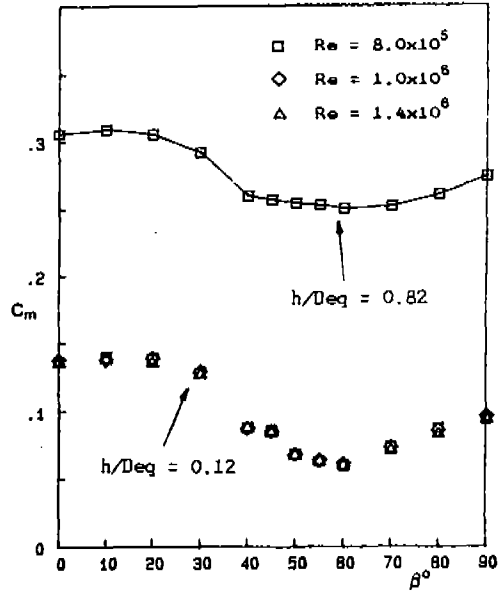
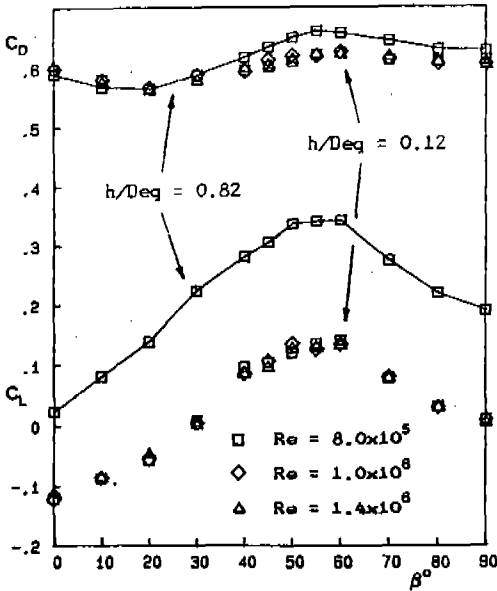


Fig. 8 Aerodynamic Coefficients of the Present Model near the Ground (Forebody 1).

에서 剝離된 흐름이 水平面(S2) 위에서 대부분 再附着되는데, 傾斜面과 水平面 사이에 生成된 剝離氣泡가 커짐에 따라 背面압력(Base Pressure)이 減少하여 C_D 가 增加하게 된다.

한편, Fig. 10은 $\beta = 70^\circ$ 인 경우로 傾斜面의 上端에서 흐름의 剝離가 생기는데, 傾斜角에 비해서 水平面の 길이가 짧기 때문에 剝離된 흐름이 水平面に 再附着되지 않는다. 이때는 剝離氣泡가 生成되지 않는 근접한 후류의 特性을 나타내므로 背面압력이 상대적으로 커져

서 C_D 가 減少하게 된다.

위와같은 可視化 實驗結果로부터 自動車의 臨界現象이 뒷부분의 剝離樣式과 관련된다는 것을 確認할 수 있었다.

4. 結論 및 建議

市販되는 自動車 모양 중의 하나인 노치-백 自動車를 단순화시켜 만든 實驗모델을 사용하여 힘과 모우멘트의 測定과 表面 흐름의 可視化를 수행함으로써 다음과 같은 事實들을



Fig. 9 Surface Oil Flow Visualization ($\beta = 50^\circ$)



Fig. 10 Surface Oil Flow Visualization ($\beta = 70^\circ$)

알아냈다.

첫째, 노치-백 자동차도 뒷유리창의 傾斜角이 변함에 따라 抗力이 局部的으로 最大되는 臨界現象을 나타낸다. 그리고 해치-백 자동차의 實驗結果와의 比較로부터 傾斜角 γ 가 자동차의 流動特性에 큰 影響을 끼치는 變數라고 생각된다. 그리고 임계현상에 나타나는 臨界角이 자동차의 外形設計에 우선적으로 考慮되어야 하는 값이므로 傾斜角 γ 의 重要性을 다른 實驗을 통하여 確認할 필요가 있다.

둘째, 자동차의 安定性 問題와 관련되는 피칭모우멘트도 臨界現象을 나타내었으나, 뒷유리창의 傾斜角(β)의 變化에 따른 C_m 의 變化는 C_D , C_L 의 傾向과는 相反되게 나타난다.

세째, 노치-백 자동차의 臨界現象에 앞부분의 모양은 거의 影響을 끼치지 않는다.

네째, 自由流狀態에서 나타나는 臨界現象의 特性과 比較할 때 노치-백 자동차의 실제 자동차 높이에서의 特性은 해치-백 자동차의 경우와 類似하다.

다섯째, 表面 흐름의 可視化 結果로부터 노치-백 자동차의 臨界現象을 지배하는 剝離樣式은 해치-백 자동차의 경우와는 다르다는 것을 알 수 있었다. 즉, 노치-백 자동차의 臨界現象은 뒷유리창의 上端에서 剝離된 흐름이 水平面 위에서 再附着되는지의 與否와 관련되어 있다.

끝으로 노치-백 자동차의 臨界現象과 관련된 뒷부분의 剝離樣式을 규명할 수 있는 研究가 더 필요하다고 여겨진다.

後 記

本 研究는 僑現代自動車의 財政的 支援으로 수행되었음을 밝혀두며, 이에 深甚한 感謝를 表한다.

參 考 文 獻

1. T. Morel, "Aerodynamic Drag of Bluff Body Shapes Characteristic of Hatch-Back Cars", SAE Paper 780267, 1978.
2. G. Sovran, T. Morel and W.T. Mason, Jr, "Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles", pp. 191-226, Plenum Press, New York, 1978.
3. T. Morel and C. Dalton, "Aerodynamics of Transportation", pp. 53-59, ASME, New York, 1979.
4. T. Morel and C. Dalton, "Aerodynamics of Transportation", pp. 93-103, ASME, New York, 1979.
5. S.R. Ahmed, "Wake Structure of Typical Automobile Shapes", ASME J. of Fluid Engineering, Vol. 103, pp. 162-169, 1981.
6. S.R. Ahmed, "Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles", ASME J. of Fluid Engineering, Vol. 105, pp. 429-434, 1983.
7. J.E. Hackett, J.E. Williams and J. Patrick, Jr, "Wake Traverses behind Production Cars and Their Interpretation", SAE Paper 850280, 1985.
8. 배귀남, "노치-백 자동차의 공기역학적 특성", 한국과학기술원 석사학위논문, 1987.
9. G.W. Carr, "Influence of Rear Body Shape on the Aerodynamic Characteristics of Saloon Cars", M.I.R.A. Report 1974/2, 1974.