

단순화된 트랙터-트레일러의 기저 압력저항 감소에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Base Pressure Drag Reduction of a Simplified Tractor-Trailer

고 상 호,* 박 승 오**
S. H. Ko, S. O. Park

ABSTRACT

The effect of base cavities on the drag of a simplified tractor-trailer model for $Re=4.1 \times 10^5$ is investigated experimentally. Three different types of base cavities are studied in this work. They are solid-wall, slitted-wall, and slotted-wall cavities.

Slotted-wall cavity is found to be most effective for drag reduction. A maximum of 11% reduction in the zero-yaw drag coefficient is achieved with the slotted wall cavity.

1. 서 론

오늘날 대중 육상 운송 수단으로서 가장 많이 차지하고 있는 수단은 대형트럭이라 할 수 있겠다. 트랙터-트레일러의 모양이나 크기는 법적인 제한내에서 최대한으로 화물을 적재하여야 하는 기능적인 면이 중시되어 그 형태는 일정한 단면을 가진 긴 물체가 되었다. 그러므로, 트랙터-트레일러의 전면부와 후면부는 유선형이라기 보다는 뭉툭한 물체(bluff body)가 되어 공기역학적인 측면에서 볼 때 상당히 큰 항력 계수를 갖게 되었다. 트랙터-트레일러의 경우 주행시 받게되는 공기역학적 항력의 대부분은 트랙터와 트레일러의 전면부에서 흐름의 박리(flow separation)에

의한 전면부 항력(forebody drag)으로 전체 항력의 약 70%를 차지하게 되며, 트레일러의 뒷부분에서 발생하는 흐름의 박리(flow separation)로 인한 기저항력(base drag)이 약 20%, 그리고 공기의 점성으로 인한 표면마찰항력(skin friction)이 약 10%를 차지하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 이와 같은 트랙터-트레일러의 공기역학적 항력감소를 위한 많은 연구들이 수행되어 왔는데, 트랙터-트레일러의 전면부의 항력을 감소시키기 위한 연구로는 roof-fairing 과 트랙터와 트레일러 사이를 막아주는 gap-seal 을 장착하여 약 35%의 항력감소를 얻을 수 있었으며²⁾, 국내에서도 비교적 간단한 형태의 2차원 roof-fairing 을 적용하여 약 15%의 항력 감소를

* 한국과학기술원 항공우주공학과, 현재 삼성항공(株) 근무

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

연을 수 있음이 보고 되었다.³⁾ 한편 트랙터-트레일러의 후면부 항력(base drag) 감소 장치에 관한 연구로서 tail-guide vane 과 cavity wall 을 들 수 있는데, tail-guide vane 은 후면 압력을 증가시키는 데에는 큰 효과가 있으나 자체의 항력 증가로 인하여 실질적이 항력 감소의 효과는 볼 수 없었던 것으로 알려져 있다.^{3,4)} W. T. Mason 과 P. S. Beebe⁵⁾ 는 트레일러의 뒷부분에 solid-wall cavity 를 장착하여 항력계수를 약 0.03 정도 줄일 수 있었다. 이러한 cavity wall 은 트랙터 트레일러 외의 다른 뭉뚱한 물체에도 적용되었었는데, J. F. Nash 등이 2차원의 뭉뚱한 후면을 가진 airfoil 의 뒷부분에 slotted wall cavity 와 solid-wall cavity 를 장착하여 실험한 결과 solid wall 의 경우는 20%의 기저 항력감소 효과를 그리고 slotted wall 의 경우는 60%의 기저 항력감소 효과를 얻었다고 보고한 것이 그 일례이다.⁶⁾ W. A. Mair⁶⁾ 는 축대칭형 물체(axis-symmetric body) 의 뒷부분에 solid-wall cavity, slotted-wall cavity, slitted-wall cavity 를 장착하여 항력의 감소를 얻었으며, 그중 가장 효과적인 장치는 slotted-wall cavity 였음을 발표하였다. 그는 또 cavity wall 의 근접후류에서 축방향의 속도성분을 측정하여 cavity wall 이 축대칭형 물체의 후류에 발생하는 vortex 의 shedding 을 억제하는 효과가 있음을 밝혔다.

트랙터-트레일러 후면의 벽면근처 후류의 유동장은 Fig.1 에 도시한 것과 같이 올려흐름(upwash)이 발생하고 높이방향으로 압력

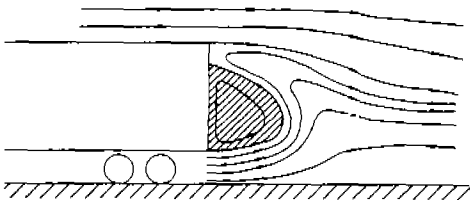


Fig.1 Schematic of the near wake flow of a tractor-trailer

구배가 꽤 큰 특성을 갖는다.⁴⁾ 트랙터-트레일러의 밑면을 지난 흐름은 후면으로부터 후면의 등가직경의 약 1/2 정도 떨어진 곳 인쪽에서 올려흐름이 발생하여, 후면을 향하는 역흐름과 하류로 흘러가게 되는 흐름으로 구분된다. 이 역흐름은 트레일러의 후면에 재 부착하여, 후면의 아랫부분에서 재순환 영역을 형성한다. 그러나 후면의 윗 부분에서는 재순환영역이 형성되지 않는다. 이러한 유동 형태는 후면의 폭을 따라 거의 비슷하게 형성되며, 후면의 높이 방향 압력 구배 또는 폭방향으로 거의 같은 양상을 띄게된다. 이러한 기저의 압력은 자유흐름의 정압보다 낮은 것이 보통인데, 이것이 항력의 원인이 되고, 이를 기저항력(base drag)이라고 한다.

현재까지는 전술한 바와 같이 트랙터-트레일러의 항력의 대부분을 차지하는 전면부 항력을 감소시키는 방안에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 본 연구에서는 후면부 항력 감소에 주안점을 두어 solid-wall cavity, slotted wall cavity, slitted cavity 를 트랙터-트레일러의 전면부를 곡면으로 단순화시킨 모델에 장착하여 각 cavity 의 길이에 따른 항력을 측정 비교하므로써 기저 압력 저항의 감소효과를 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 풍동은 미국 Aerolab 회사에서 제작한 개방형 아음속 풍동으로 시험부(test section)는 폭 1016mm, 높이 711mm, 길이가 1524mm인 사각형이다. 시험부 단면의 속도 분포는 측정해본 결과 $\pm 0.4\%$ 이하로 매우 균일하고, 풍동의 난류계수는 1.39 이고, 이것을 난류강도로 환산하면 0.5% 정도이다.

자동차의 풍동 실험을 수행하는데 가장 중요하게 고찰되어야 하는 것 중의 하나는 지면을 실제 주행조건과 근접하도록 모사(simulation)하는 것이다. 모사방법으로는 동일한 2개의 모델을 대칭으로 설치하는 방법, 고정지면판, 이동지면판 등이 있다. 지면판을 사

용하는 위의 2 가지 방법에 있어서 실험결과에 미치는 요소에는 경계층으로 인한 변위두께(displacement thickness)와 모델과 지면판 사이의 간격에 대한 모델 대표길이의 비로 표시하는 간격효과(clearance effect)가 있다. 변위두께는 지면판의 표면 기울기와 곡면을 변화시킴으로 해서, 압력구배를 변화시키고 모델에 약간의 받음각(incidence) 효과를 가져온다. 따라서 경계층을 제어하기 위해서 흡입(snction) 또는 분출(blowing) 시킴으로써 이의 효과를 억제시킨다. A. Berndtsson et. al.⁷⁾의 결과에서 보면, 고정지면판에서 위의 2 가지 방법을 사용하여 변위두께를 감소시키면 항력은 증가하고 양력은 감소하는 것으로 나타나 있으며 경계층 제어가 없는 경우와 비교해 볼 때 실험조건에 따라 1~4%의 항력증가가 발생하였다. 또한 간격효과는 P. W. Bearman⁸⁾의 결과에서 보면 간격이 커질수록 양력은 작아지며, 항력의 경우 서로 다른 형태의 지면판에서의 값 차이는 별로 없는 것으로 나타나 있으며, 본 실험에서와 같이 고정지면판에서 모델이 받음각이 0°인 경우에는 간격에 관계없이 일정한 값을 보이고 있다. 따라서, 본 실험의 경우는 항력 측정주 목적을 두고 있으므로 고정지면판을 사용하여도 무방할 것으로 생각되어 진다.

본 실험에서 사용된 지면판은 참고문헌⁹⁾의 연구에서 사용되었던 것으로서, 알루미늄 합금으로 만들어졌으며, 폭은 920 mm, 길이는 1510 mm, 두께는 6.4 mm로 시험부의 크기와 거의 같고, 풍동의 바닥으로부터 190 mm 높이에 위치한다. 또한 지면판 아래에 노출된 모델 지지대를 흐름과 격리시키기 위하여 익형 모양의 wind-shield를 실험에 사용하였다. (Fig.2 참조)

실험을 위한 모델은 C. O. E. (cab-over-engine)형 트랙터-트레일러의 전면부를 대폭 단순화시킨 약 1/25 축소 모델을 제작하였다. 즉, 트랙터와 트레일러 사이의 공간(gap)을 없애고, 트랙터의 전면부를 곡면으로 처리하였는데 앞부분은 반경 100 mm 인 사분원으로, 아랫 부분은 반경 25 mm의 사

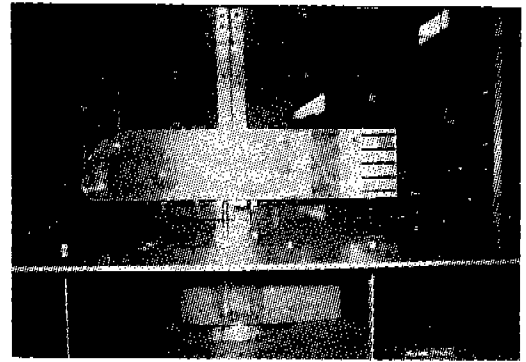


Fig.2 Photograph of a model tested in the present work

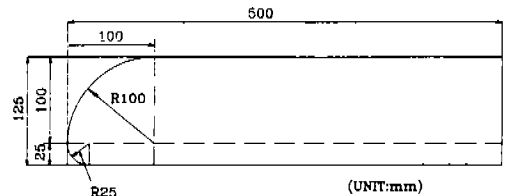


Fig.3 Schematic of the simplified tractor-trailer model

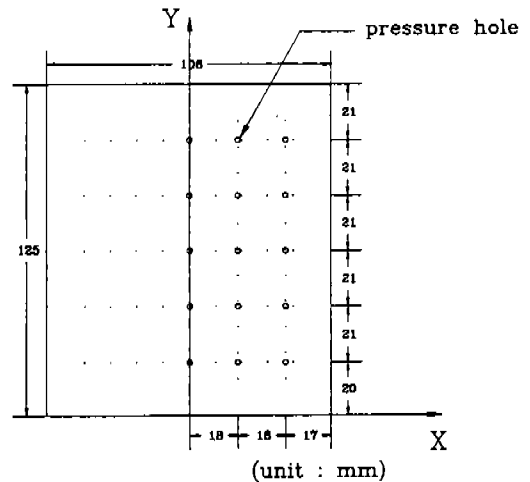
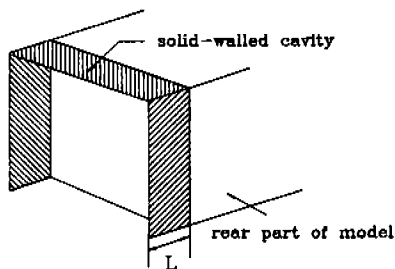


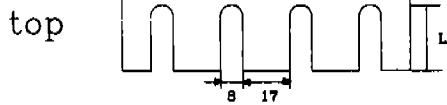
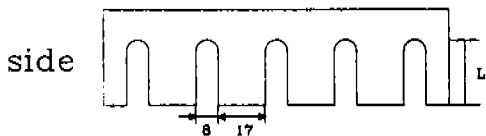
Fig.4 Pressure hole locations for base pressure measurement

분원으로 처리하였으며, 그 모양은 Fig.3에 나타냈다. 모델은 가공하기 쉬운 두께 5 mm 인 아크릴로 제작되었으며, 모델의 뒷부분에 항력감소장치를 장착하기 위해 앞부분과 뒷부분으로 분리 제작하였다. 후면에는 외경 1 mm, 내경 0.7 mm인 정압 측정용관을 15 개

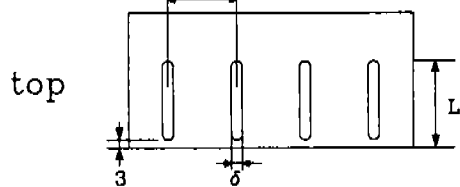
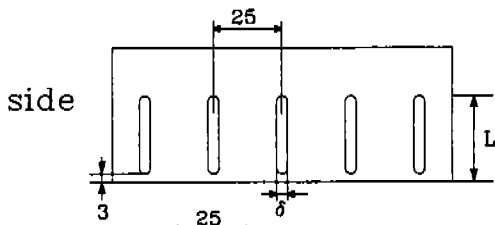
설치하였는데, 편각(yaw angle)이 영(zero)도에 대한 측정만 시도하였으므로, 후면 중앙선을 기준으로 해서 우측에만 설치하였다(Fig. 4). 모델은 밸런스로부터 지지봉(model support spindil)으로 연결되며, 모델의 앞부분과 뒷부분은 나사로 고정 한 후에 흐름에 영



(a)



(b)



(c)

Fig.5 (a) Solid-wall cavity mounted on the model.

(b) Schematic of slitted wall cavity.

(c) Schematic of slotted wall cavity.

향이 없도록 테이프로 붙였다.

트랙터-트레일러의 후면압력(base pressure)을 증가시켜 항력 감소를 위한 장치로서는 solid-wall cavity, slitted wall cavity, slotted wall cavity의 세가지 형태의 cavity wall을 사용하였다(Fig.5). 각 cavity wall은 모델의 뒷부분의 양쪽 옆면과 뒷면에 분리되어 부착될 수 있도록 제작되었으며, 사용된 각 cavity wall들의 기하학적 특징은 Table 1에 나타나 있다. Slotted wall과 slitted wall의 slot (slit)은 cavity wall의 양쪽 옆면에 각각 5개, 뒷면에 4개를 뚫어 총 14개의 slot (slit)을 갖게 되며, 이 장치들은 모델의 뒷부분에 직경 2mm인 작은 볼트와 너트로서 장착되도록 하였다.

Table 1. Geometric parameters for various cavity types

		Length : L/D
solid-walled cavity		0.1, 0.13, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8
slitted wall cavity		0.1, 0.13, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
slotted wall cavity	$\delta = 8\text{mm}$	0.2, 0.3, 0.4, 0.5
	$\delta = 4\text{mm}$	0.1, 0.13, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

풍동 실험시 모델이 받는 공기력을 측정하기 위하여 Aerolab 회사의 Pyramidal balance를 사용하였고, 모델의 후면 압력분포 측정에는 scanivalve를 사용하였다. 기타 측정장치 및 자료 처리도는 Fig.6에 나와 있다.

모든 실험은 모델의 편각(yaw)이 없는 상태에서 모델의 폭을 기준으로 한 레이놀즈수(Re)를 4.1×10^6 (풍속 55m/sec에 해당)로 하고 수행하였다. 실험에 사용된 모델의 지면인접도는 $h/D = 0.3$ 으로 실제와 비슷하게 하였다. 여기서 h 는 모델의 지면판으로부터의 높이이고, D 는 모델 최대 단면적에 해당되는 등가 직경으로 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

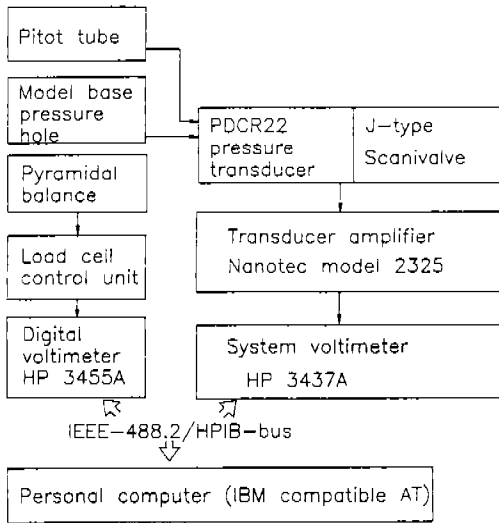


Fig.6 Block diagram showing the data acquisition system

여기서 A 는 모델의 단면적이며, 본 실험의 경우에 있어서 D 는 대략 13cm이다.

항력 측정은 매 실험시 0.2초 간격으로 300번씩 읽어 들여 평균, 표준편차, 최대, 최소를 구하였으며, 각 경우마다 보통 4회 정도로 반복 측정하여 자료로 타당성을 검토한 후 그 평균을 대표값으로 취하였다. 항력 측정의 경우 표준편차는 평균값에 대해 본 실험에서 수행된 모든 경우에 대하여 3.6% 이내의 값을 가지고 있었다. 모델의 기저 압력분 또는 모델의 후면에 설치된 15개의 정압공으로부터 scanivalve를 사용하여 얻은 기저의 압력과 시험부 선단의 10cm 우방에 설치된 피토관에서 얻은 자유 흐름의 정압력과의 차이를 무차원화 하고 이를 평균하여 얻은 기저평균압력계수를 기저 압력의 대표값으로 취하였다. 기저평균압력계수는 다음과 같이 표시된다.

$$C_{pb} = \frac{\sum_{i=1}^{15} C_{pbi}}{\sum_{i=1}^{15} i}$$

여기서 $C_{pbi} = \frac{P_{bi} - P_{\infty}}{q}$ 이고, P_{bi} 는 모

델의 각 측정점에서의 정압, P_{∞} 는 자유류의 정압이다. 측정은 각 후면 압력공마다 400 Hz의 sampling rate로 1024개의 자료를 읽어 들여 평균을 취하였다.

시험부에 모델 등이 장착되면 지시동압과 실제 동압간에 차이가 생기는데 이런 차이를 고려하기 위하여 봉쇄 보정(blockage correction)방법을 사용한다. 자동차와 같은 뭉뚱한 물체(bluff body)의 경우에 잘 맞는 봉쇄 보정 방법은 아직 잘 알려져 있지 않으므로, 비교적 간단한 몇가지 방법을 실험결과에 적용한 후 이 중에서 보정 값이 가운데 정도인 방법을 선택하였는데, 그 방법은 다음식과 같다.

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

여기서 q 는 보정된 동압, q_i 는 지시동압, C 는 지면판 위의 시험부 단면적, A 는 모델의 최대 단면적이다. 이는 시험부에 지면판이 장착되면 흐름이 지면판의 윗 부분과 아랫 부분으로 나뉘어 지므로, 시험부 중에서 지면판 위의 유효면적만을 고려하여 1차원의 연속 방정식을 사용한 M.I.R.A. 방법¹⁰⁾에 의한 것이다.

3. 실험결과

본 연구를 통하여 얻은 항력계수 (C_D)의 변화양상과 평균 기저 압력계수 C_{pb} 의 변화양상을 Fig.7과 Fig.8에 정리하였다. Fig.7에서 $L/D=0$ 의 경우는 cavity wall이 장착되지 않은 상태에서의 항력 계수를 나타낸다. 따라서 Fig.7은 cavity wall을 장치하므로써 후면 압력에 의한 항력계수가 줄어들고 있는 것을 보이고, 항력계수의 감소량은 cavity의 형태와 길이에 따라 달라지고 있음을 나타내고 있다. 또한 여러가지 cavity 형태 중 slotted-wall cavity ($\delta=4mm$)가 가장 효과적임을 알 수 있다. 여러 형태의 cavity에 따라 항력계수의 차이가 나게 되는 구체적인

이유는 아직 확실히 밝혀지지 않고 있다. 다만, Fig.8에서 볼 수 있는 것처럼 cavity를 장치하게 되면 후면의 압력이 증가되어 평균 압력계수가 더 커지게 되는 것이 항력감소의 중요한 원인 중의 하나라는 것을 짐작할 수 있다. 참고문헌 (5)와 (6)에 의하면 solid-wall cavity는 후류의 안정성을 증가시켜 shedding하는 vortex의 세기를 약화시키는 효과가 있으며, slotted-wall cavity는 후류안정 효과와 외부의 고압공기가 기저부분으로 유입되는 효과가 있다고 하였다. Fig.7과 Fig.8의 데이터에 의하면 slitted-wall cavity의 경우에는 이 두가지 효과가 다른 경우에 비해서 비교적 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

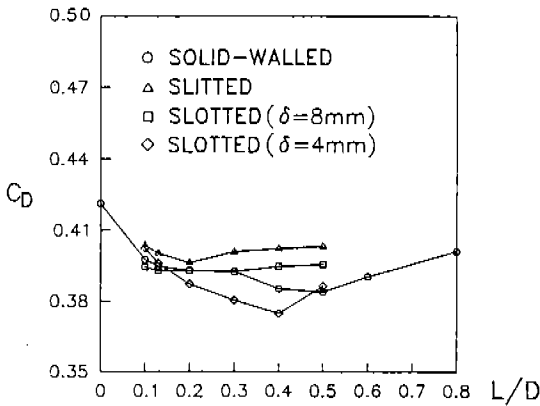


Fig.7 Drag coefficient variations for various cavity types

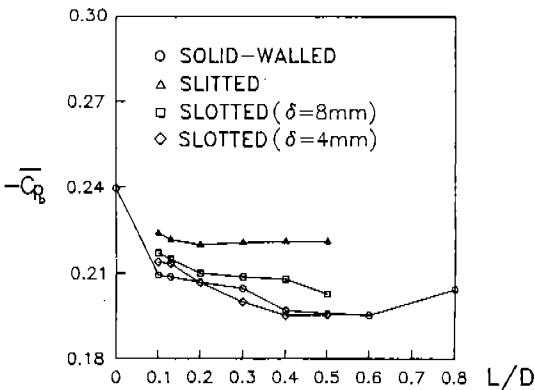


Fig.8 Average base pressure coefficient variations for various cavity types

Fig.7에서 cavity wall의 길이가 커지면 항력계수가 증가하게 되는 현상이 보이고 있는데, 이는 cavity wall 자체의 항력(예를 들어 마찰항력)이 커지기 때문이다. Fig.7은 또한 slotted wall cavity($\delta=4\text{mm}$)의 경우 cavity wall의 길이가 $0.4D$ 인 경우가 가장 효과적임을 보여주고 있다. Slot의 폭, δ 에 따라서도 항력계수의 변화가 상당함을 알 수 있는데, 이에 대한 조사는 추후의 연구과제로 미루고자 한다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 단순화된 트랙터-트레일러의 기저압력 저항을 줄이기 위한 방법으로 여러 형태의 cavity를 부착하여 실험을 수행한 결과 가장 효과적인 형태인 cavity는 slotted-wall cavity ($\delta/D=0.03$)임을 알았고, cavity의 길이가 $0.4D$ 일때 약 10%의 항력저항 감소를 가져옴을 알 수 있었다. 본 연구에서 다룬 트럭모양의 물체에 대한 solid-wall cavity와 slotted-wall cavity의 항력 감소 효과는 2차원 물체나 축대칭물체의 경우와 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 slotted-wall cavity 등과 관련된 기하학적 변수가 워낙 많아, 최적의 slotted-wall cavity가 어떤 형태인지에 대한 연구와 cavity에 의한 후면압력 저항이 감소하는 원인에 대한 구체적인 실증과 그 해석에 대해서는 앞으로 추가적인 실험연구가 필요한 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 “첨단유체공학 연구센터(포항공대)”의 연구과제의 하나로 이루어졌음을 밝히며, 일부 재정적 지원에 대해 관계자 제위께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. C. H. Marks, F. T. Buckley, Jr. and W. H. Wals-

- ton, Jr., "A Study of Base Drag of Tractor-Trailer Trucks," *Journal of Fluids Engineering*, 1978, vol.100, pp.443-448.
2. C. H. Marks, F. T. Buckley, Jr. and W. H. Walston, Jr., "An Evaluation of the Aerodynamic Drag Reductions and a Gap Seal on Tractor-Trailer Trucks," SAE Paper No.760105, 1976.
3. 이경태, 김종철, 홍용식, "공기 역학적 저항 감소에 의한 트랙터-트레일러의 연료절감," *한국 항공 우주 학회지*, 제10권 제2호, 1978, pp.80-90.
4. W. T. Mason, Jr. and P. S. Beebe., "The Drag Related Flow Field Characteristics of Trucks and Buses," in *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff bodies and Road Vehicles*, G. Sovram, T. Morel, and W. T. Mason, eds. 1978, Plenum Press.
5. D. J. Maull, "Mechanisms of Two and Three-Dimensional Base Drag," in *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*, G. Sovram, T. Morel, and W. T. Mason, eds., 1978, Plenum Press.
6. W. A. Mair., "Drag-Reducing Techniques for Axi-symmetric Bluff Bodies," in *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*, G. Sovram, T. Morel, and W. T. Mason, eds., 1978, Plenum Press.
7. A. Berndtsson, W. T. Eckert and E. Mercker, "The Effect of Groundplane Boundary Layer Control on Automotive Testing in a Wind Tunnel," SAE Paper No.880248, 1988.
8. P. W. Bearman, "Some Effects of Free-stream Turbulence and The Pressure of The Ground on The Flow around Bluff Bodies," in *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*, G. Sovram, T. Morel, and W. T. Mason, eds., 1978, Plenum Press.
9. 배귀남, 박승오 "노치-백 자동차의 공기역학적 입계현상에 관한 실험적 연구," *한국 자동차 공학회지* 제9권 제5호, 1987, pp.41-48.
10. G. W. Car., "Wind Tunnel Blockage Corrections for Road Vehicles," M. I. R. A. Report No.1971/4, 1971.