수동제어 장치를 이용한 3 차원 자동차 모형의 항력감소

이 욱† · 사공웅* · 최해천**

Drag Reduction of a Three-Dimensional Car Model Using Passive Control Device

Wook Yi, Woong Sagong and Haecheon Choi

Key Words : Three-dimensional car model(3 차원 자동차 모형), Drag reduction(항력감소), Passive control device(수동제어 장치), Boat-tail(보트 테일), Slant angle(기울어진 각도), Separation bubble(박리기포)

Abstract

In this study, a passive control using a boat-tail device is conducted for a three-dimensional car model in ground proximity. We consider various boat-tails and investigate the mechanism of drag reduction by them. By varying the length and slant angle of boat-tail, we obtain drag reductions up to 40%. From the oil-surface flow visualization and hot-wire measurement, the drag reduction by the boat-tail is characterized by the shear-layer instability and reattachment on the boat-tail, forming a small separation bubble at the upstream part of boat-tail surface, resulting in the delay of main separation and drag reduction. At high slant angles, the flow fully separates and drag is nearly same as that of no control.

1. 서 론

최근 운송체의 연비 절감이 중요한 문제로 대두됨에 따라, 운송체의 공기저항을 줄이기 위한 노력이 많이 이루어지고 있다. 그러나 버스, 트럭, 승용차와 같은 3 차원 운송체 주위의 유동은 매우 복잡하고, 주 박리점이 운송체의 끝단에 고정되어 있기 때문에, 효과적인 항력 감소 장치의 개발은 매우 어려운 일이다. 따라서 이러한 연구는 간단한 형태의 축대칭 물체들[1~3] 과 3 차원 모형들(three-dimensional models) [4~12] 에 대하여 수행 되어져 왔으며, Wong & Mair [5], Han *et al.* [9] 과 Khalighi *et al.* [10] 등은 보트 테일 장치(boat-tail device)를 이용하여 성공적으로 항력을 감소시켰다.

그러나 보트 테일에 의한 항력 감소 효과에 대한 기존의 연구들은 물체의 후류 영역의 유동장 변화와 단순한 힘 측정에 국한되어져 왔다. 또한 보트 테일의 다양한 형상 변화에 따른 연구도 이루어져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 보트 테일의 길이, 기울어진 각도(slant angle) 등을 다양하게 변화시켜, 그에 따른 항력 계수의 변화를 살펴보고, 항력 감소를 위한 최적화된 보트 테일의 형상을 얻고자 한다. 또한, 보트 테일 주위의 유동장을 열선 속도계(hot-wire anemometer)와 표면 가시화(oil-surface flow visualization)를 통해 관찰하여 보트 테일에 의한 항력 감소 메커니즘(mechanism)을 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 풍동은 저속, 흡입식, 개방형이다. 최대 속도는 30m/s이며 실험속도는 15m/s ~ 29m/s로써 3 차원 차 모형(Fig. 1(a))의 높이 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 1.0\times10^5 \sim 1.9\times10^5$이다. 이 실험 범위에서의 난류강도는 0.7% 이하다. 풍동 실험부의 크기는 300(높이)×400(폭)×1200(길이, mm)이며 투명 아크릴로 제작되었다.

† 비회원, 서울대학교 대학원
E-mail : wyi71@dreamwiz.com
TEL : (02)888-8243

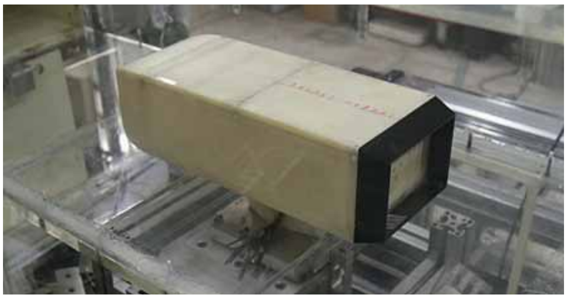
* 비회원, 서울대학교 대학원

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

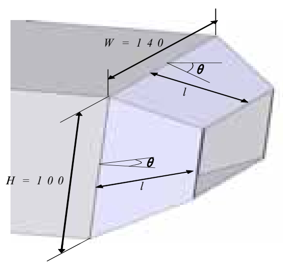
실험에 사용된 3 차원 차 모형은 Han *et al.* [9] 과 Verzicco *et al.* [11] 에 의해 연구 되어진 모델과 동일한 것이다. 길이(L), 높이(H), 폭(W) 은 각각 360, 100, 140(mm)이다. 모형과 풍동 바닥과의 간격은 20mm이며, 풍동 단면적(A_W)과 모델의 단면적(A_M)을 기준으로 한 차폐율(blockage ratio, A_M / A_W)은 12% 이다. 모형은 자유 유동 방향에 0°의 요각(yaw angle)과 피치각(pitch angle)을 갖도록 설치되었다.

모형의 항력은 로드셀(Cass, BCL－1L)에서 나오는 전압을 증폭기에서 증폭하여 측정하였다.

공동(cavity)을 가진 보트 테일(Fig. 1(b))의 길이는 l/H=0.1, 0.3, 0.5 로 하였다. 또한 위, 아래, 옆면의 기울어진 각은 동일하며, 각의 크기는 θ=0°~40°로 다양하게 변화시켰다. 보트 테일 주위의 유동장은 본 연구실에서 직접 제작한 열선유속계와 I 타입 열선 프로브로 측정하였다. 과열비 1.25 로 하였을 때 30kHz 이상의 응답 주파수를 보였으며, 경계층의 각 측정 위치에서 16kHz 로 20 초 동안 데이터를 받았다.



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Three-dimensional model with boat-tail and (b) schematic of boat-tail with cavity (mm).

오일 표면 가시화는 적당한 점성을 유지하도록 식용유에 흰색의 Titanium-dioxide 가루를 섞은 물질을 사용하여 수행하였다.

3. 결과

연구에 사용된 3 차원 차 모형은 높은 차폐율을 가지고 있다. 따라서 계측된 항력 계수(C_{DM})를 Maciejewski & Osmolski [13] 의 항력 계수 보정식(correction of the drag coefficient) (1)을 사용하여 교정했다.

$$C_{DC} = \{ 1 - 2(A_M / A_W) + (A_M / A_W)^2 \} \times C_{DM} \quad (1)$$

식(1)으로 수정된 항력 계수(C_{DC})는 Re=1.7×10^5 에서 0.296 으로 Han *et al.* [5] 의 항력 값(C_D = 0.3)과 거의 같은 값을 얻었다. 3 차원 차 모형에서 보트 테일의 수동제어 효과를 보기 위하여 다양한 형상의 보트 테일을 실험하였다.

Fig. 2 는 보트 테일의 기울어진 각(θ)에 따라 항력 계수의 변화를 보여주고 있다. 이러한 항력 계수의 변화는 길이가 다른 보트 테일에서도 유사한 결과를 보였으며, 레이놀즈 수의 영향을 거의 받지 않았다. 따라서 보트 테일 제어에 의한 항력 계수의 변화들을Re=1.7×10^5 과 l/H=0.3 에 집중해서 살펴보겠다.

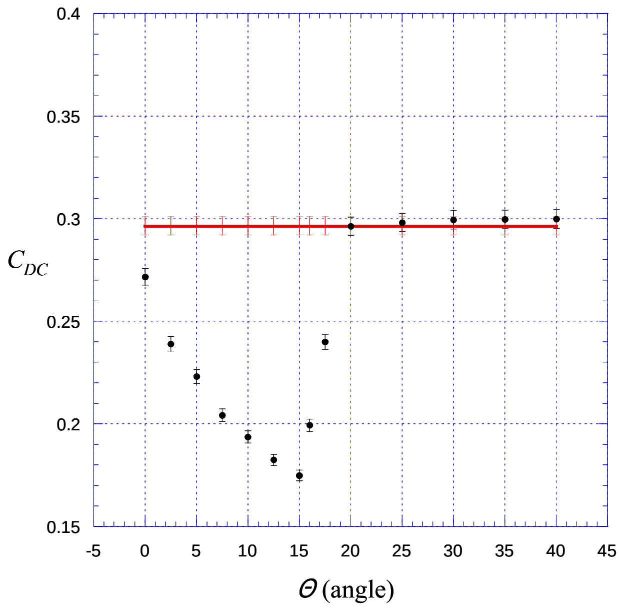


Fig. 2 Drag coefficient as a function of slant angle of boat-tail at Re = 1.7×10^5 and l/H = 0.3: —, without control; ●, with control.

먼저, 기울어진 각이 0°에서 15°로 증가함에 따라 항력은 더욱 감소한다. 16°와 20° 구간에선 각의 변화에 따라 매우 빠르게 항력이 증가한다. 마지막으로, 20°이상의 큰 각들에선 제어전의 항력과 거의 같음을 보이고 있다. 항력은 임계각(critical angle, 15°)에서 가장 크게 감소했으며 40%의 항력감소를 얻을 수 있었다.

보트 테일 제어의 결과로 나타난 위와 같은 항력 감소의 메커니즘을 살펴보기 위해, 보트 테일 표면에서 오일 가시화와 주변 유동장 측정을 수행하였다.

보트 테일 표면에서 오일 가시화(Fig. 3)는 기울어진 각에 따라 4 개의 특징적인 유동장을 보이고 있다. 먼저, θ = 0°~5° (Fig. 3 (a)) 경우 모형을 지난 유동이 보트 테일의 표면에 부착되어 지나가는 2 차원적 유동 특성을 보인다. θ = 7.5°~15°에선 Fig. 3 (b) 처럼 보트 테일의 상류 부분에서 작은 박리기포(separation bubble)가 생기고, 유동은 재부착(reattachment) 되어 흐른다. Fig. 2 에서 보여지는 것과 같이 항력 계수가 최저값에서 급격하게 증가하여 제어전의 저항 값으로 회복되는 단계(θ=16°~20°)에선(Fig. 3(c)), 보트 테일의 상류에서 유동이 완전히 박리되고 보트 테일의 양 모서리에서 강한 보텍스(vortex)가 생성되고 있는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, slant angle 이 20°보다 큰 각들 표면의 오일은 중력에 의해 그냥 흘러 내린다. 이는 모형의 끝에서 발생한 주유동의 박리에 의한 보텍스가 보트 테일의 표면에 크게 영향을 주지 못하고 있기 때문이다 (Fig. 3 (d)).

(a) θ = 5°

(b) θ = 15°

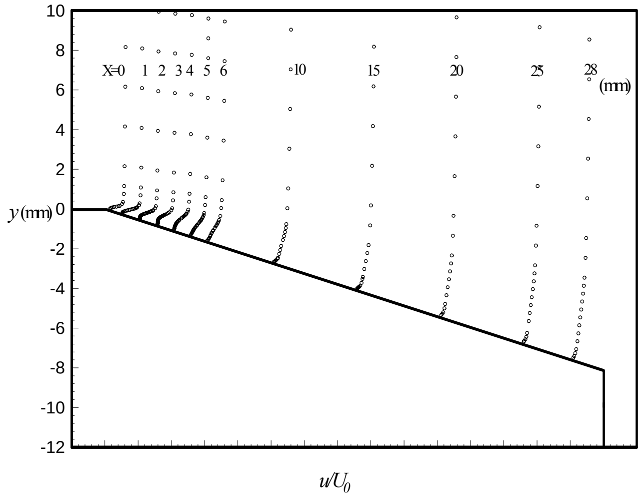
(c) θ = 20°

(d) θ = 25°

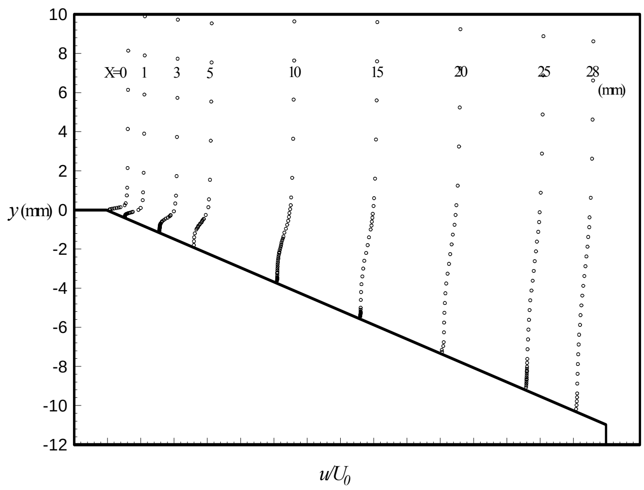
Fig. 3 Oil-surface flow visualization on boat-tail at $Re = 1.7\times10^5$ and $l/H = 0.3$.

Fig. 4 는 slant angle 15°와 20°를 갖는 보트 테일의 중심 (center)을 따라 계측된 유동 방향 평균속도분포이다. 임계각 15°의 경우, 유동은 x=1~5mm 부근에서 속도변화가 거의 없는 영역이 벽 가까이 존재하고 있다. 그러나 이 영역을 지나 x=6mm 부근에서 유동이 다시 경계층 유동 속도 분포를 보인다. 이를 통해, 유동이 모형의 끝에서 박리가 되어 보트 테일 상류 부분에 아주 작은 박리기포를 생성하고, 보트 테일 표면에 재부착되고 있음을 알 수 있다. 그리고 x=6mm 이후의 유동장을 살펴보면, 유동이 보트 테일 표면에 잘 부착되어 움직이고 있으며, 주 유동의 박리는 보트 테일 끝으로 밀려나 있음을 볼 수 있다. 그러나 20°의 경우엔 주 유동의 박리가 이미 모형의 끝단에서 일어나고 있음을 보여준다.

가시화와 속도장 측정결과들을 통해, 보트 테일의 각이 임계각으로 증가할수록 보트 테일의 상류 부분에서 박리기포가 생성되고, 이로 인해 유동이 재부착되고, 주 유동 박리가 지연되어 모형에 작용하는 항력이 감소함을 알 수 있었다. 또한 임계각보다 큰 각의 경우엔 모형의 끝단에서 주유동이 완전히 박리되어, 3 차원 모형 후류 영역이 제어전의 상태로 되돌아오게 됨으로서, 항력은 보트 테일이 없는 경우와 유사하게 됨을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 4 Mean velocity profiles on boat-tail surface at *Re* = 1.7×10^5 and $l/H = 0.3$; (a) θ= 15°, (b) θ =20°.

4. 결론

3 차원 차 모형의 항력 감소를 위해 수동제어 장치인 보트 테일을 적용하였다. 보트 테일의 기울진 각(slant angle), 길이 변화시켜 형상에 따른 제어효과를 관찰하였다.

보트 테일에 따른 항력 계수는 레이놀즈 수의 영향은 거의 받지 않았으나, 기울어진 각에 따라 급격한 반응을 보였다. 기울어진 각이 0°도에서 임계각(critical angle)으로 증가 할수록 항력은 감소 했고, 임계각에서 최대 40% 항력 감소를 얻었다. 임계각보다 큰 각들에서 저항은 최소값에서 급격하게 증가하기 시작하여, 제어하기 전의 값과 거의 같아졌다.

보트 테일의 다양한 형상에 따른 항력 변화의 메커니즘을 알아보기 위해 오일 가시화와 속도장 측정을 수행하였으며 항력을 최대로 감소시키기 위해서는 보트 테일 표면에 작은 박리기포 생성이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 가장 큰 항력 감소를 보이는 경우에는 보트 테일 상류 부분에서 아주 작은 박리기포가 생성된다. 이 박리기포를 따라서 전단층 불안정성(shear layer instability)에 의해 난류강도가 증가한다. 이렇게 증가된 난류는 유동의 운동량을 증가시키고 유동은 보트 테일의 표면에 재부착되어 보트 테일 뒷 부분에서의 역압력 구배를 극복한다. 그 결과 주 유동의 박리는 보트 테일 하류의 끝단에서 일어나고 저항은 크게 감소한다. 그러나 임계각보다 큰 기울어진 각들에서는 박리기포가 생성 되지 않으며, 박리기포가 생성되는 경우에 비해 상대적으로 항력 감소 효과가 적거나 거의 변화가 없었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실사업과 교육인적 자원부의 BK21 Program 의 지원하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Mair, W. A., 1969, "Reduction of Base Drag by Boat-tailed Afterbodies in Low-Speed Flow," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 20, pp. 307~320.

(2) Morel, T., 1979, "Effect of Base Cavities on the Aerodynamic Drag of an Axismmetric Cylider," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 30, pp. 400~412.

(3) Howard, F. G. and Goodman, W. L., 1985, "Axisymm-etric Bluff-Body Drag Reduction Through Geometric-cal Modification," *J. Aircraf*, Vol. 22, No. 6, pp. 516~522.

(4) Peterson, R. L., 1981, "Drag Reduction Obtained by the Addition of a Boattail to a Box Shaped Vehicle," *NASA Contractor Report* 163113. pp. 1~23.

(5) Wong, D. T. M. and Mair, W. A., 1982, "Boat-tailed

Afterbodies of Square Section as Drag-Reduction Devices," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 12, pp. 229~235.
(6) Ahmed, S. R. and Ramm, G., 1984, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," *SAE paper*, 840300, pp. 1~32.
(7) Kohri, I. and Numata, N., 1988, "Effects of Rear-end Configuration of Vehicles on Aerodynamic Drag,", *Int. J. of Vehicle Deaign*, Vol. 9, No. 2, pp216~225.
(8) Han, T., Hammond Jr., D. C. and Sagi, C. J., 1992, "Optimization of Bluff Body for Minimum Drag in Ground Proximity," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 882~889.
(9) Han, T., Sumantran, V., Harris, C., Kuzmanov, T., Huebler, M. and Zak, T., 1996, "Flow-Field Simulations of Three Simplified Vehicle Shape and Comparisons with Experimental Measurements," *SAE paper*, 960678, pp. 75~90.
(10) Khalighi, B., Balkanyi, S. R. and .Bernal, L., P2002, "Analysis of the Near Wake of Bluff Bodies in Ground Proximity," ASME conference in New Orleans, LA, November 17-22, pp. 1~11.
(11) Verzicco, R., Fatica, M., Iaccarino, G., Moin, P. and Khalighi, B., 2002, "Large Eddy Simulation of a Road Vehicle with Drag-Reduction Devices," *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 12, pp. 2447~2455.
(12) .Storms, B. L., Satran, D. R., Heineck, J. T. and Walker, S. M., 2004, "A Study of Reynolds Number Effect and Drag-Reduction Concepts on a Generic Tractor-Trailer," 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, pp. 1~20.
(13) Maciejewski, M. and Osmσlski, W., 2002, "Numerical Simulation of the Blockage Effect in Win-Tunnels," Proceedings 14th European Simulation Symposium.