

익형 동체의 하강기류(Down-wash)가 공기역학적 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석연구

윤 경 호,¹ 김 철 호*²

¹서울과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과

²서울과학기술대학교 공과대학 기계·자동차공학과

A NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF DOWN-WASH OF A WING-BODY ON ITS AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

K.H. Yoon¹ and C.H. Kim*²

¹Graduate School of Industry Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

²Dept. of Mechanical & Automotive Engineering Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology

Drag reduction of a running vehicle is very important issue for the energy savings and emission reduction of its power train. Especially for a solar powered electric vehicle, the drag reduction and weight lightening are two serious problems to be solved to extend its driving distance under the given energy condition. In this study, the ground effect of an airfoil shaped road vehicle was studied for an optimum body design of an ultra-light solar powered electric vehicle. Clark-Y airfoil type was adopted to the body shape of the model vehicle to reduce aerodynamic drag.

From the study, it was found that the drag of the model vehicle was reduced as the height(h) between ground and the lower surface of the model vehicle was decreased. It is due to the reduction of the down-wash decreasing the induced drag of the vehicle. The lift was also decreased as the height decreased. It is due to the turbulent boundary layer developed beneath the vehicle body. The drag is classified into two types; the form and friction drag. The fraction of form drag to friction one is 76 to 24 on the model vehicle. As the height(h) of the model vehicle from the ground surface increases the form drag also increases but the friction drag is in reverse.

Key words : 공기저항(Aerodynamic drag), 유도저항(Induced drag), 표면마찰저항(Friction drag), 압력저항(Pressure drag), 하강기류(Downwash), 전산유체역학(CFD), 날개끝 와류(Wing-tip vortex)

1. 서 론

단면이 에어포일(airfoil) 형상을 갖는 익형동체(wing-body)는 고속주행 차량의 항력(drag)을 최소화하고 양력을 유도하기 위한 에어스포일러장치로 사용되고 있다[1,2]. 익형동체의 양쪽 끝단에서 발생하는 날개끝단 와류(wing-tip vortex)는 익형동체 후방에 하강기류(down-wash)를 유도하여 동체 상에 공

기의 유도저항(induced drag)을 유발하게 된다. 본 연구에서는 익형동체의 지고(地高) 변화에 따른 하강기류의 특성변화를 이해하고 이러한 현상이 익형동체의 공기역학적 특성에 어떤 영향을 미치는가를 수치해석 연구를 통해 알아보았다.

본 연구의 결과는 솔라셀(photovoltaic cell)에서 발전되는 소량의 전기에너지를 이용하여 장거리 주행이 가능한 초경량 태양광발전 전기자동차(ultra-light electric vehicle powered by solar energy)의 차체에 적용할 익형동체의 최적화 설계에 적용하게 된다. 본 연구에서 익형동체에 적용할 기본 에어포일(airfoil)의 형상은 Clark-Y형 에어포일로 선정하였으며 익형동체의 폭(width)과 지고의 변화에 따른 익형동체 후방에서의 하강기류의 변화와 그에 따른 차체 상에서 발생하는 공력특성을 분석해 보았다.

Received: April 30, 2013, Revised: August 2, 2013,

Accepted: August 2, 2013.

* Corresponding author, E-mail: profchkim@seoultech.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2013.18.3.008>

© KSCFE 2013

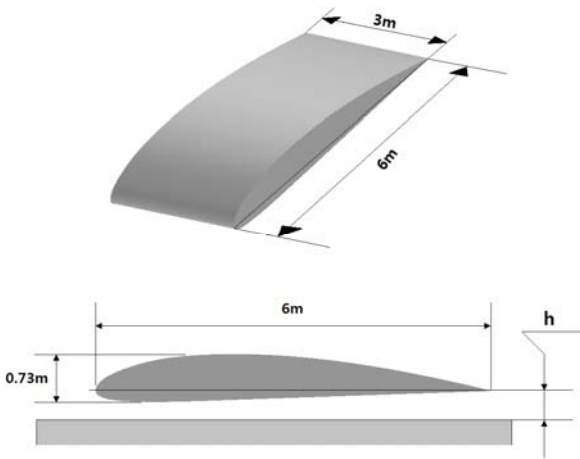


Fig. 1 Prospective view of the model wing-body; Clark-Y Airfoil (h=0.2 m ~ 5.0 m), angle of attack(α)=0 degree

2. 익형동체 형상과 공력특징

2.1 모델 익형동체의 형상 및 제원

본 연구에서는 익형동체의 지고(地高)변화에 따른 동체 형상 주위에서 발생하는 공기역학적 특성변화를 이해하기 위해 동체 형상은 클라크 와이형(Clark-Y type) 에어포일 형상으로 채택하였다[3]. Fig. 1은 익형동체의 형상저항(form drag)을 최소화하기 위해 도입한 에어포일 모양의 차체형상과 크기 제원을 보여준다.

익형동체의 크기는 길이 6 m, 높이 0.73 m이며 폭은 3 m이며 동체의 지고(地高)는 0.2 m에서 10 m까지 변화를 시켰다. 높이 변화에 따라 익형동체의 양단 끝(wing-body tip)에서 발생하는 날개끝 와류(wing-tip vortex)의 변화와 이에 따른 익형동체 후방에서 발생하는 하강기류(down-wash)가 물체의 항력(drag)과 양력(lift)에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보았다. 본 연구결과는 익형동체형 차체를 갖는 차량의 주행동력(Road-load power)을 최소화하는 차체형상설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

2.2 모델차체의 공력특성

자동차의 주행저항을 최소화하여 주행거리를 극대화하기 위해서는 차체에 작용하는 공기저항과 굴림저항을 낮추어야 한다. 특히 태양광 전기자동차 설계에서 차량의 경량화를 통한 굴림마찰력과 차체 외형의 공기역학적 설계를 통한 공기저항력의 최소화는 매우 중요한 설계요소이다[4].

Fig. 2는 Clark-Y형 에어포일 형상의 익형동체가 상대바람이 없는 수평도로를 90 km/h로 주행할 때 차체 주위에서 발생하는 공기 유동현상을 보여준다. 그림 (a)는 차체 측면에서

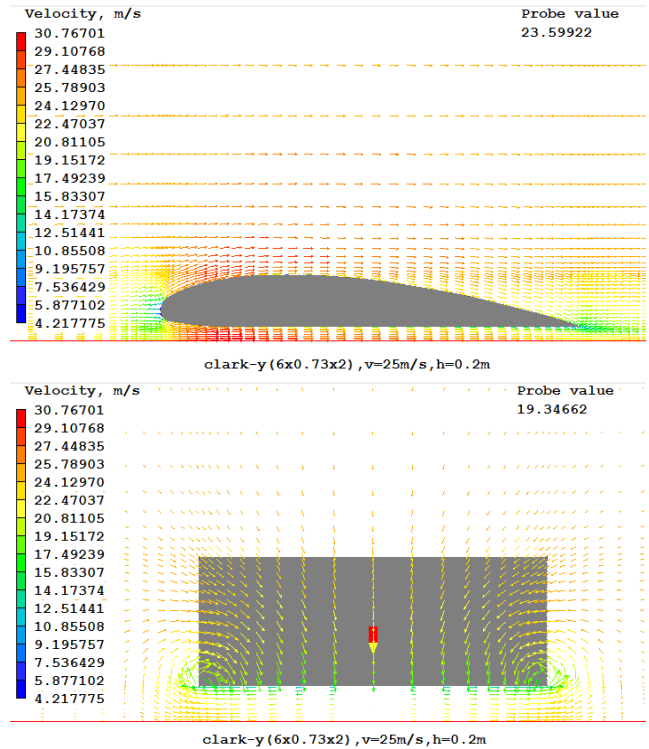


Fig. 2 Aerodynamic characteristics around a model vehicle (Clark-Y) at 90 km/h: (a) side-view, (b) rear-view

의 속도분포를 나타내며 차체 전방에는 정체영역(stagnation region)이 존재하고, 차체 하단부 전방에서는 속도가 상부에 비해 증가하나 하단부 후방에서는 흐름속도가 감소하는 사실을 알 수 있다. 그림 (b)는 차체의 후방부에서 발생하는 날개 끝 와류(wing-tip vortex) 현상을 보여준다. 이러한 날개 끝 와류 현상은 공기가 날개 하단부를 빠져나가는 속도에 영향을 줄 수 있으며 동시에 차체의 공기 받음각(angle of attack)을 변화시켜 궁극적으로 유도저항(induced drag)을 유도하여 차체의 공기저항을 증가시키는 역할을 하게 된다.

3. 수치해석 연구를 위한 해석기법과 조건

3.1 수치해석 연구를 위한 해석기법

Clark-Y형 차체를 갖는 차량이 주행할 때 차량 주위에서 발생하는 공기의 유동현상을 수치해석 기법으로 묘사하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 적용하는 범용 CFD코드인 PHOENICS(ver. 2011)[5]을 사용 하였다. 차량이 바람이 없는 수평도로를 주행한다고 가정하였으며, 해석을 위한 공기의 유동장은 다음과 같이 정의하였다.

- 준3차원 유동(Quasi-3D Flow)
- 난류유동(Turbulent Flow)

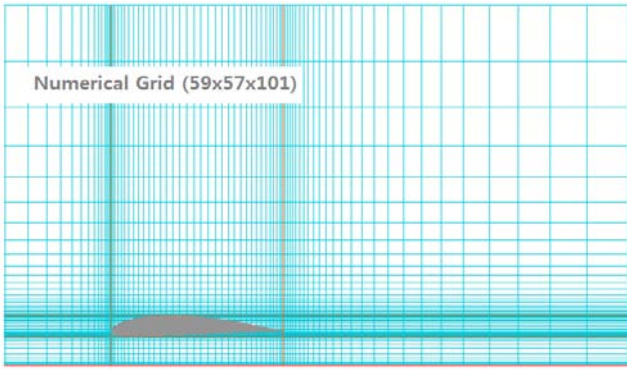


Fig. 3 A typical numerical grid of the model wing-body with (59 x 57 x 101) grid

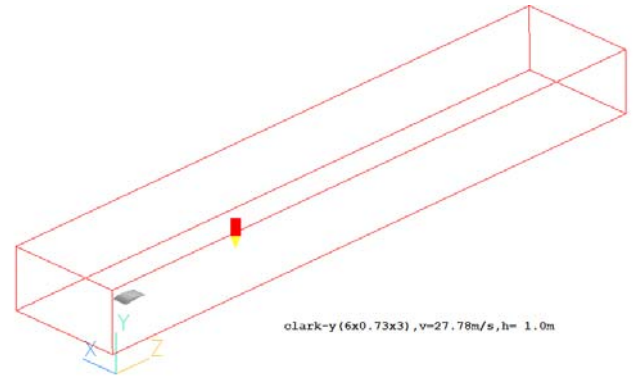


Fig. 4 A numerical domain of the model vehicle (Model-10); (domain size : 28 m x 15 m x 150 m)

- 비압축성유동(Incompressible Flow)
- 정상유동(Steady Flow)
- 등온유동(Isothermal Flow)

검사체적내의 비압축성 난류유동장 해석을 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식[6]을 풀었으며, 난류해석을 위해 표준 ($\kappa - \epsilon$) 모델[7]을 사용하였다. 공기의 점도가 낮으므로 차체 표면에서의 마찰저항에 의한 대류 열전달의 현상은 무시하여 에너지 방정식은 풀지 않았다. 유동해석의 수렴성 판단을 위해 각 변수들의 계산 잉여율(residual fraction)이 10^{-3} 이하로 떨어질 때까지 충분히 반복적으로 계산하였다. 비압축성, 난류 유동장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

지배방정식(Governing Equations);

- 연속방정식(continuity equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial y_j} + \frac{\partial U_k}{\partial z_k} = 0 \quad (1)$$

- 운동량방정식(momentum equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - g_i \quad (2)$$

- 난류운동에너지 방정식(turbulent kinetic energy)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \epsilon \quad (3)$$

- 소산방정식(energy dissipation equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (4)$$

where $-\overline{u_i u_j} = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$

$$G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$(C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.0)$$

3.2 수치해석 연구를 위한 격자 생성법

해석 공간에서의 격자생성을 위해 CAD-to-CFD 격자 생성법(grid generation method)[5]을 이용하였다. 범용 3D CAD프로그램인 ProEngineer (Ver. 5.0)를 이용하여 모델 익형동체의 3차원 형상을 만들고 이 CAD 파일을 해석 공간인 수치해석도메인(numerical domain)으로 불러와 직각 좌표계 상에서 정방격자(rectangular grid)를 생성하여 해석을 위한 격자 파일을 완성하였다. Fig. 3은 익형동체가 지면에서 1.0 m 이격된 (Model-10)의 수치격자계의 예를 보여준다. 검사체적 내에서의 해석격자의 크기는 격자시험을 거쳐 최종적으로 결정된 (59x57x101)으로 약 34만개의 격자로 형성하였다.

Fig. 4는 본 연구의 해석을 위한 계산영역의 크기를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 해석의 신뢰성을 높이기 위해 익형동체 후방에 충분한 계산영역을 주어 검사체적 내에서 유동장이 충분히 발달되도록 하였다.

3.3 수치해석의 경계 및 초기조건

유동장 내에서 속도와 압력의 값을 산출하기 위해 SIMPLE 알고리즘[7]을 적용하였으며 난류운동방정식(standard - turbulent model)의 대류 항(convection term) 계산을 위해 하이브리드

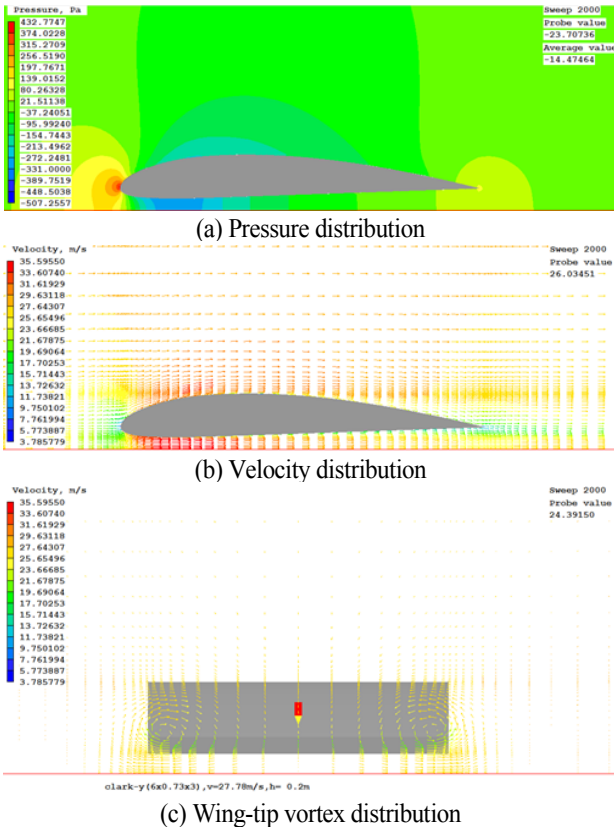


Fig. 5 Flow field characteristics of the model wing-body at $V_{body} = 100 \text{ km/h}$ and $h=0.2 \text{ m}$

(hybrid scheme)[7]방법을 사용하였다.

해석을 위한 경계 및 초기조건

- Inlet : 속도경계 조건($V_{vehicle} = 60 - 140 \text{ km/h}$)
- Outlet : 유동장이 완전히 발달되었다는 조건하에 압력경계 조건($P_{out} = 1 \text{ atm}$)
- Surface of model vehicle : No-slip 경계조건
- Low wall : 차량의 속도와 동일한 속도경계조건

3.4 해석적 연구를 위한 주요변수 및 범위

차량의 지면과의 높이변화에 따른 공기역학적 특성인 양력과 항력의 변화를 알아보기 위해 Table 1에 주어진 바와 같이

Table 1 Variables of the model vehicle for simulation

Model	Configuration	Remarks
1 Model-02		$h = 0.2 \text{ m}$
2 Model-04		$h = 0.4 \text{ m}$
3 Model-07		$h = 0.7 \text{ m}$
4 Model-10		$h = 1.0 \text{ m}$
5 Model-20		$h = 2.0 \text{ m}$
6 Model-50		$h = 5.0 \text{ m}$
7 Model-100		$h = 10.0 \text{ m}$

$V_{body} = 100 \text{ km/h}$

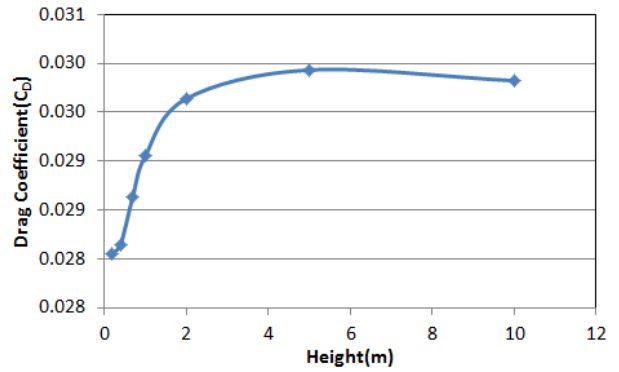


Fig. 6 Variation of drag coefficient (C_D) of the model wing-body with the height (h)

차량의 주행속도는 100 km/h 로 고정하고 차체의 높이를 7단계로 변화하며 공력특성의 변화를 비교분석하였다.

4. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 Clark-Y형 에어포일 형태를 도입한 익형동체의 지면높이 변화에 따른 차체에 발생하는 공력특성인 양력과 항력의 변화특성을 정성, 정량적으로 분석해 보았다.

4.1 해석결과의 정성적 분석

익형동체 표면에서의 압력분포는 바디에 작용하는 공기역학적 힘의 크기로 나타난다. Fig 5는 지고(h) 0.2 m 에서 익형동체의 속도가 100 km/h 일 때 바디 주위에서의 압력분포, 속도분포 그리고 바디 양쪽 끝단에서의 와류(wing-tip vortex) 현상을 보여준다. 그림 (a), (b)에서 알 수 있듯이 익형동체의 정면에 매우 강한 정체압력(stagnation pressure)이 나타나며 바디 하단부 전방에서 지면효과에 의해 공기의 흐름속도가 급격하게 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이는 바디의 양력을 떨어뜨리는 현상을 유발하게 된다. 그림 (c)는 익형동체의 후방에서 공기유동장을 관찰한 그림으로 동체 후방의 양쪽 끝단에서 발생하는 날개끝단 와류(wing-tip vortex)현상을 보여준다. 이러한 와류현상은 바디 후방에서의 하강기류(down-wash)를 유도하여 익형동체의 항력을 증가시키는 역할을 하게 된다.

Fig. 6은 모델 익형동체의 지면 높이변화에 따른 항력계수(C_D)의 변화를 보여준다. 지면에서의 높이가 높아질수록 항력이 증가하는 것으로 나타난다. 이는 익형동체가 지면에서 멀어질수록 동체의 날개끝 와류(wing-tip vortex)현상이 커지므로 인해 유도 저항력(induced drag)이 높아지기 때문이다. 즉 익형동체가 지상으로부터 높아질수록 동체 후방에서 하강기류현상이 커지며 이 현상이 유도저항의 크기를 증가시키기 때문이다.

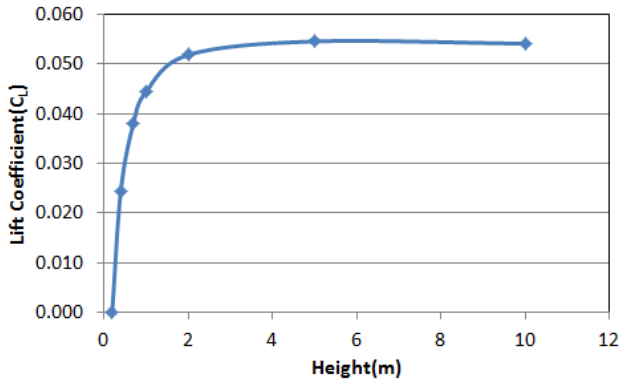


Fig. 7 Variation of lift coefficient (C_L) of the model wing-body with the height (h)

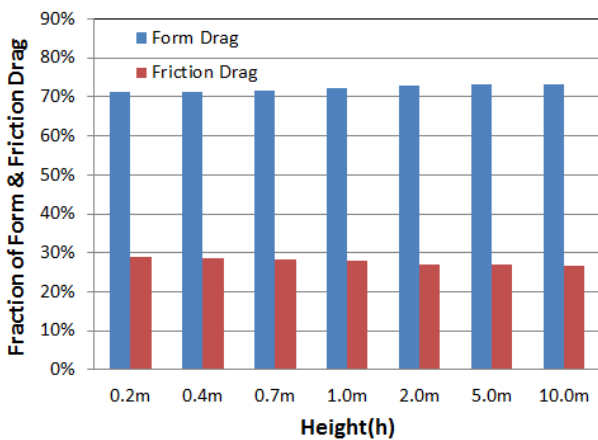


Fig. 8 Fraction of form drag and friction drag of the model wing-body with the height (h)

Fig. 7은 익형동체의 높이 변화에 따른 양력계수의 변화를 보여준다. 양력크기 역시 바디의 지고(h)에 따라 증가하다가 약 2 m이상의 높이에서는 양력이 크게 변화하지 않는다는 사실을 알 수 있다. 지고(h)가 0.2 m인 경우 양력의 크기는 매우 작다는 사실을 보여준다.

Fig. 8은 익형동체에 발생하는 공기저항력 중 형상저항 (form drag)과 점성에 의한 표면 마찰저항(friction drag)의 크기를 비교한 결과이다. 바디의 지고(h)가 높아질수록 형상저항이 증가하는 것으로 나타났으며, 반면 마찰저항은 감소하는 것으로 나타났다. 즉 지고(h)가 높아질수록 차체 후면에서의 하강기류의 크기가 증가하므로 유도저항이 증가한다는 사실을 보여준다.

Fig. 9는 익형동체 후방에서 날개끝 와류(wing-tip vortex)에 의해 유도되는 하강기류의 크기 변화를 비교해 보았다. 즉 익형동체가 지면에서 멀어질수록 하강기류의 크기가 증가하며 지면에 가까워질수록 지면효과에 의해 하강기류가 줄어든

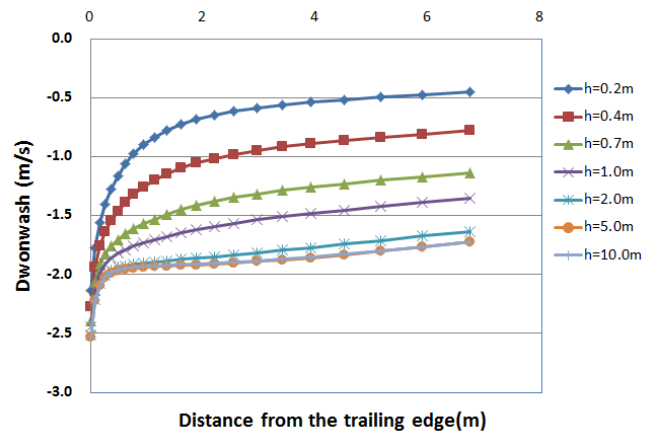


Fig. 9 Variation of the downwash at the rear of the model wing-body with the height (h) at the meridian line of the model

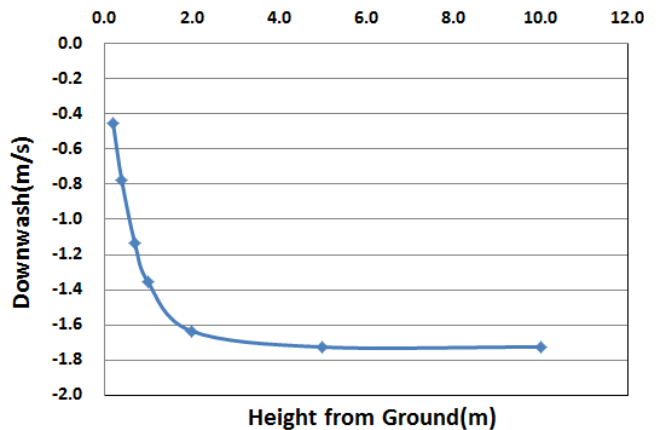


Fig. 10 Variation of the down-wash at 7 m rear of the model wing-body with the height (h)

다는 사실을 알 수 있다. 또한 익형동체 후방에서 멀어질수록 하강기류의 크기가 작아진다는 사실을 알 수 있다. 이는 익형동체 부근에서 발생하는 하강기류의 세기가 바디에서 멀어질수록 약화됨을 의미한다.

Fig. 10은 익형동체의 지고(h) 변화에 따른 후방 7 m에서의 하강기류의 크기를 비교한 결과이다. 익형동체가 지면에서 멀어질수록 하강기류가 커진다는 사실을 알 수 있다. 그러나 지고(h)가 약 2 m를 벗어나게 되면 하강기류는 크게 변화하지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이는 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타났던 항력과 양력의 크기변화가 지고(h) 약 2 m를 벗어나는 영역에서 크게 변화하지 않는 결과로 나타났다. 즉 익형동체 후방에서의 하강기류의 크기는 바디의 공기역학적 특성에 영향을 준다는 사실을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 Clark-Y형 에어포일을 기본 형상으로 하는 익형동체의 지고(h)변화에 따른 차체에 발생하게 되는 공기역학적 특성의 변화를 알아보았다. 차체가 지면에 가까워질수록 바디 하부의 공기속도 증가로 인해 양력이 감소하게 되며 동시에 하강기류(down-wash)의 감소로 인해 유도저항도 감소하게 된다. 본 수치해석 연구를 통해 익형동체 형상에서 지고(h)의 변화가 미치는 영향에 관해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 익형동체가 지면에 가까워질수록 날개끝 와류(wing-tip vortex)의 감소에 따라 하강기류(down-wash)가 감소되어 유도저항이 감소된다.
- (2) 바디가 지면에 가까워질수록 양력이 감소하게 된다는 사실을 알 수 있었다. 이는 지면과 차체하단부와의 사이에서 유체의 흐름의 가속으로 인해 차체 상·하면에서의 압력차가 작아져 양력의 크기가 작아지는 것으로 판단된다.
- (3) 익형동체에 발생하게 되는 항력은 형상에 의한 압력저항과 마찰저항으로 구분되는데 압력저항의 경우 차체가 지면에 가까워질수록 감소하며, 마찰저항의 경우 지면에서 멀어질수록 감소함을 보여준다. 압력저항의 경우 지고(h)가 높아질수록 후방 하강기류의 발달로 인해 유도저항의 증가에 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.
- (4) 익형동체 후방에서의 하강기류(down-wash)는 날개끝단에서의 와류(wing-tip vortex)에 영향을 받는다. 그러나 바디가 지면에 가까워질수록 지면의 영향으로 하강기류가 발달하지 못하게 되며, 또한 익형동체에서 멀어질수록 바디 후방에서의 하강기류의 효과는 줄어든다는 사실을 알 수 있었다. 본 익형동체 모델의 경우는 지고(h)가 2 m를 벗어날 경우 하강기류의 크기가 일정한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 장거리 주행용 초경량 태양광 발전 전기자동차의 개발과정에서 차체에 발생하는 양력의 극대화를 통해 굴림 저항을 최소화하고, 항력을 최소화하여 공기저항을 최소화하는 차체설계에 반영될 것이며 이러한 공기역학적 최적화 설계를 통해 설계차량의 주행거리를 극대화하는데 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원 사업으로 수행된 연구결과이다.

References

- [1] 1998, Kim, C.H., Yun. D.G. and Lee C.M., "A Numerical Study on the Aerodynamic Effects of a Rear-Side Spoiler on the Driving Stability of a Passenger Car," *Journal of SNUT*, Vol.47, pp.113-124.
- [2] 2005, Kim, C.H. and Youn, C.B., "Aerodynamic Effect of Roof-Fairing System on a Heavy-duty Truck," *IJAT*, Vol.6, No.3, pp.221-227.
- [3] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>
- [4] 1996, Barnard, R.H., *Road Vehicle Aerodynamic Design*, Addison Wesley Longman Ltd.
- [5] 2011, *PHOENICS Technical Report (TR/326)*, Concentration Heat And Momentum Ltd.
- [6] 2001, Douglas, J.F., *Fluid Mechanics*, Prentice Hall, pp.406-447.
- [7] 1980, Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co..