

차간 거리가 주행차량의 공력특성에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

김 대 규,¹ 김 철 호^{*2}

¹서울과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과

²서울과학기술대학교 공과대학 기계·자동차공학과

A NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF VEHICLE-TO-VEHICLE DISTANCE ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MOVING VEHICLE

D.G. Kim¹ and C.H. Kim^{*2}

¹Graduate School of Industry Seoul National Univ. of Science and Technology

²Department of Mechanical & Automotive Engineering Seoul National Univ. of Science & Technology

Aerodynamic design of a vehicle has very important meaning on the fuel economy, dynamic stability and the noise & vibration of a moving vehicle. In this study, the correlation of aerodynamic effect between two model vehicles moving inline on a road was studied with the basic SAE model vehicle. Drag and lift are two main physical forces acting on the vehicle and both of them directly effect on the fuel economy and driving stability of the vehicle.

For the research, the distance between two vehicles is varied from 5m to 30m at the fixed vehicle speed, 100km/h and the side-wind was assumed to be zero. The main issue for this numerical research is on the understanding of the interaction forces; lift and drag between two vehicles formed inline.

From the study, it was found that as the distance between two vehicles is closer, the drag force acting on both the front and rear vehicle decreases and the lift force has same trend for both vehicle. As the distance(D) is 5m, the drag of the front vehicle reduced 7.4% but 28.5% for the rear-side vehicle. As the distance is 30m, the drag of the rear vehicle is still reduced to 22% compared to the single driving.

Key Words : 공기저항력(aerodynamic drag), 압력저항(pressure drag), 유도저항(induced drag), 표면마찰저항(surface friction drag), 전산유체역학(CFD), 자동차공기역학(automotive aerodynamics)

1. 서 론

차량의 공기역학적 설계는 3가지 요소에 관점을 두고 진행된다. 첫째, 차량의 공기저항력 감소를 통한 연비효율 극대화 및 유해배기의 저감, 둘째, 차량후방에서 발생하는 공기 와류현상의 안정적 유도를 통한 차량의 주행안정성 확보 그리고 세 번째는 주행 차량의 공기역학적 진동 및 소음문제의 최소화에 있다. 특히 소형 승용차량의 경우는 연비개선과 주행안정성에

설계의 관점을 두고 있다. 선행 연구들[1,2] 통해 알 수 있었듯이 차량이 주행 중 받게 되는 공기역학적 저항력 중 약 70%는 차량 정면에 걸리는 형상압력저항(form pressure drag)이며, 나머지 약 30%는 차량 후방에서 발생하는 공기의 와류현상(vortex)에 의한 유도압력저항(induced pressure drag)에 기인한다.

본 수치해석 연구에서는 차량이 고속으로 일렬 주행을 할 때 전·후방 차량의 떨어진 거리에 따른 전방차량과 후방차량의 공력특성 변화를 알아보았다.

2. 모델차량의 제원 공력특성

본 연구를 위한 모델차량은 미국자동차공학회(SAE)에서 추천하는 차량형상을[3] 기본모델로 적용하였으며, 2대의 차

Received: February 26, 2014, Revised: May 29, 2014,

Accepted: May 30, 2014.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2014.19.2.066>

© KSCFE 2014

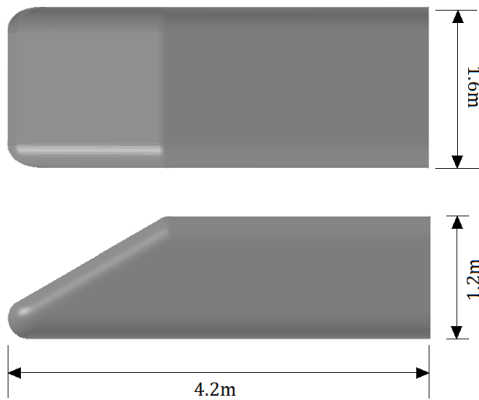


Fig. 1 2-dimensional view of the SAE model vehicle(Model-0) with zero-degree hatchback angle

량을 일렬로 정렬하고 차량의 이격거리변화에 따른 전·후방차량에 발생하는 유동특성의 변화를 살펴보았으며, 항력계수 (C_D)와 양력계수(C_L)의 변화를 정량적으로 분석해 보았다.

2.1 모델 차량의 형상 및 제원

Fig. 1은 본 연구에 적용한 SAE 모델의 형상과 크기를 보여주며 외형은 해치백형 승용차량과 유사하다.

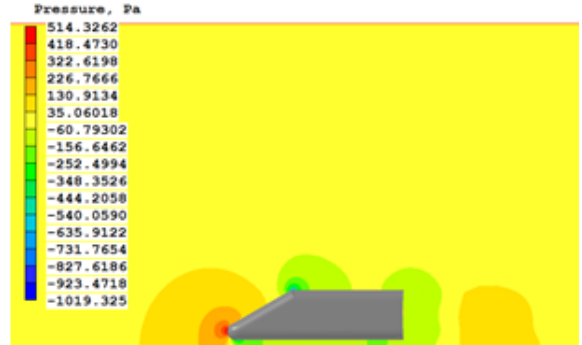
2.2 모델차량의 공력특성

Fig. 2는 SAE 모델차량이 100 km/h의 속도로 주행할 때 차체 주위에서 발생하는 공기의 복잡한 흐름 현상과 그로 인한 차체 주위에 발생하는 압력 분포를 2차원적으로 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 모델차량의 전방에서는 공기의 속도에너지가 압력에너지로 전환되어 차량 전방의 압력 혹은 형상 저항 (pressure or form drag)이 상승하는 현상을 보여준다. 차량 후면에서는 강한 와류(vortex)의 발생으로 인해 압력이 급격히 대기압 이하로 떨어져 유도 압력저항(induced pressure drag)이 발생하게 된다. 공기의 점성에 의한 표면 마찰저항(skin friction drag)도 존재하나 압력저항에 비해 매우 작으므로 본 연구에서는 무시하였다.

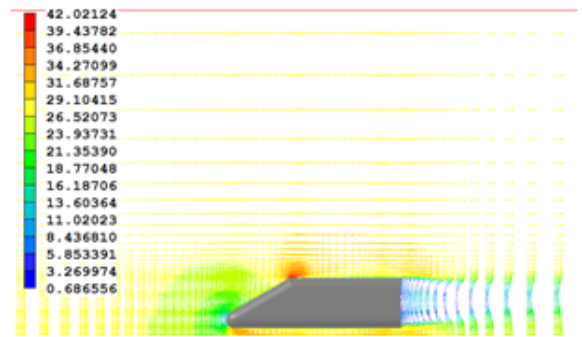
Fig. 3는 모델차량이 100 km/h의 속도로 주행할 때 유동장 내에서의 난류운동에너지 분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 모델차량의 후방에 강하게 나타나는 와류현상은 주위 공기압을 낮게 떨어뜨려 차체에 진동과 소음을 유발하게 된다.

3. 수치해석 연구를 위한 해석기법과 조건

3.1 수치해석 연구를 위한 해석기법



(a)



(b)

Fig. 2 Aerodynamic characteristics around a model vehicle at 100km/h: (a) velocity distribution, (b) pressure distribution

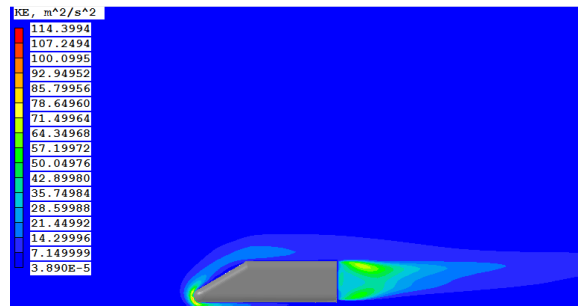


Fig. 3 Distribution of turbulent kinetic energy on the model vehicle at 100 km/h

차량이 주행할 때 차량 주위에서 발생하는 공기의 유동현상을 수치해석 기법으로 묘사하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 적용하는 범용CFD코드인 영국 CHAM사의 PHOENICS(ver. 2011)[5]를 사용하였다. 해석 경계 조건의 단순화를 위해 주행 차량의 외부에는 바람이 없다고 가정하였으며, 해석을 위한 공기의 유동 장은 다음과 같이 정의하였다.

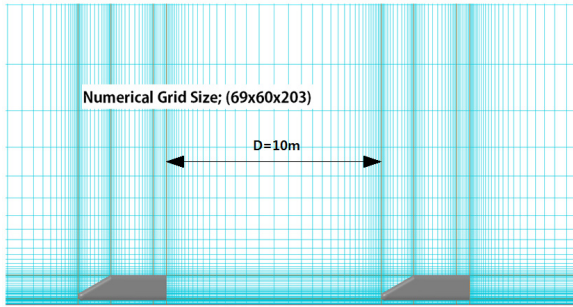


Fig. 4 A typical numerical grid of the model vehicle with the (69x60x203) grid

- 준3차원 유동 (Quasi-3D Flow)
- 난류유동 (Turbulent Flow)
- 비압축성유동(Incompressible Flow)
- 정상유동 (Steady Flow)
- 등온유동 (Isothermal Flow)

검사체적내의 비압축성 난류유동장 해석을 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식[6]을 풀었으며, 난류해석을 위해 표준 ($k-\epsilon$) 모델[7]을 사용하였다. 점성이 낮은 기체의 경우 상대적으로 표면 마찰저항이 매우 낮아 대류 열전달의 현상은 무시하여 에너지 방정식은 풀지 않았다. 또한 유동해석의 수렴성 판단을 위해 각 변수들의 계산 잉여율(residual fraction)이 10⁻⁴% 이하로 떨어질 때 까지 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)

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

- 난류운동에너지 방정식(turbulent kinetic energy)

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

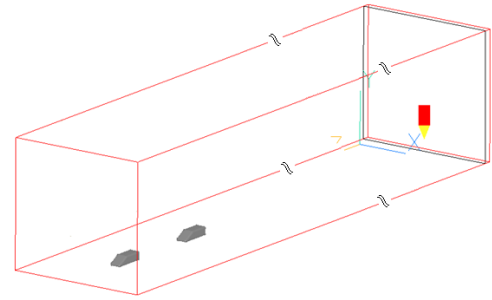


Fig. 5 A numerical domain of the model commercial bus; (domain size : 19.2 m x 17.8 m x 107.2 m)

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

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

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

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 형상파일을 수치해석 도메인(numerical domain)으로 불러와 직각 좌표계 상에서 정방격자(rectangular grid)를 생성하여 해석을 위한 격자 파일을 완성하였다.

Fig. 4는 10 m의 이격 거리를 두고 위치한 2대의 모델차량 해석을 위한 수치격자계의 예를 보여준다. 검사체적 내에서의 해석격자의 크기는 격자시험을 거쳐 최종적으로 결정된 (69x60x203)으로 약 84만개의 격자로 형성되었다.

Fig. 5는 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

(hybrid scheme)[7]방법을 사용하였다.

해석의 경계 및 초기조건:

- Inlet : 속도경계 조건($V_{SAE} = 100\text{km/h}$)
- Outlet : 유동장이 완전히 발달되었다는 조건하에 압력경계조건($P_{out} = 1\text{atm}$)
- Surface of model vehicle : No-slip 경계조건
- Low wall : 차량의 속도와 동일한 속도경계조건

3.4 해석적 연구를 위한 주요변수 및 범위

차량의 주행조건 변화에 따른 차체의 공력특성 변화에 관한 수치 해석적 연구를 위해 차량의 주행 속도와 전·후방차량 간의 이격거리(D)를 주요 연구변수로 결정하였으며 Table 1에 주어진 바와 같다.

4. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 SAE 차량모델의 차량거리 변화에 따른 전·후방차량 간의 공기역학적 특성변화를 정성, 정량적으로 비교해 보았다.

4.1 해석결과의 정성적 분석

Fig. 6는 차량 간 이격거리(D)가 5.0 m에서 주행 속도 100 kmh로 주행 할 때 전·후방 차량 주위에서 발생하는 속도장, 압력장 그리고 난류운동에너지의 분포를 보여준다.

속도분포선도(Velocity distribution)에서 보여주듯이 전방차량의 후방에서 발생하는 와류 유동장은 후방차량의 전면에서 작용하는 정체압력(stagnation pressure)에 영향을 미치게 될 것이다. 압력분포선도(Pressure distribution)에서 보여주듯이 후방차량의 전방 정체압력이 전방차량에 비해 많이 낮다는 사실을 알 수 있다. 난류운동에너지분포선도(TKE distribution) 역시 후방 차량에서의 난류운동에너지 강도가 전방차량에 비해 낮게 나타남을 알 수 있다. 이러한 전·후방차량의 유동현상

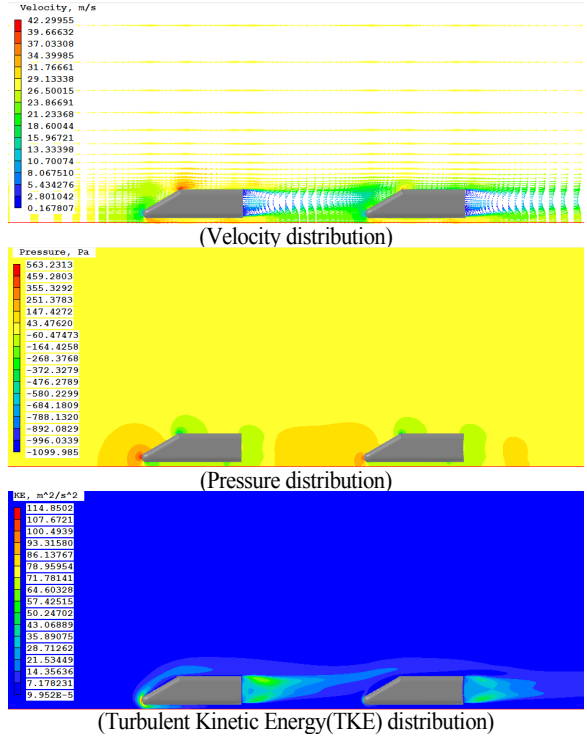


Fig. 6 Flow field characteristics of the model vehicles at $V_{SAE} = 100 \text{ km/h}$ and $D=5.0 \text{ m}$

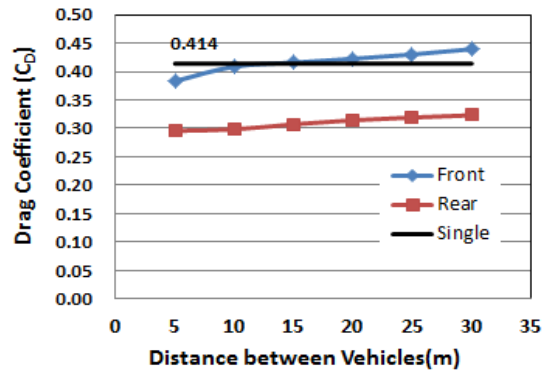


Fig. 7 Variation of the average drag coefficient(C_D) with the distance(D) of the model vehicles

변화는 차체의 공력특성변화에 크게 영향을 미치게 된다.

4.2 해석결과의 정량적 분석

Fig. 7에서 알 수 있듯이 차간 이격거리(D)가 짧을수록 항력이 낮게 나타났으며 5 m일 때 항력계수가 전방차량 0.383, 후방차량 0.296으로 가장 저항력이 낮게 나타났다. 후방차량

Table 1 Variation of the vehicle-to-vehicle distance

Type	Distance (D)	Remarks
1	Single	-
2	Type-1	5m
3	Type-2	10m
4	Type-3	15m
5	Type-4	20m
6	Type-5	25m
7	Type-6	30m

ff: front vehicle, front-side
fr: front vehicle, rear-side
rf: rear vehicle, front-side
rr: rear vehicle, rear-side

$V_{SAE} = 100\text{km/h}$, $H = 0.2\text{m}$

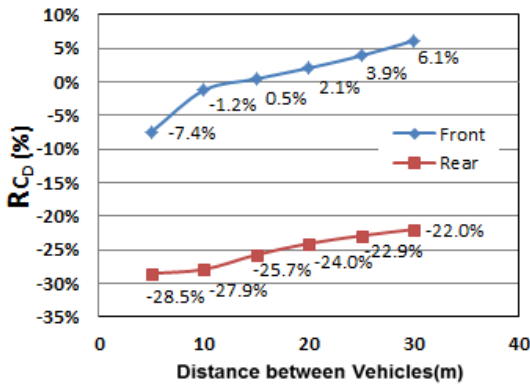


Fig. 8 Reduction rate of the drag coefficient (C_D) of each model with respect to the Type-1

의 항력계수가 전방차량에 비해 약 22.8% 낮게 나타났다. 차량 간 이격거리(D)가 멀어질수록 전방차량의 후방 유도저항이 증가하게 되며 동시에 후방차량의 전방에 걸리는 압력저항이 낮아진다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8은 Single 모델에 대비한 이격거리(D) 변화에 따른 전·후방차량 항력계수(C_D)의 변화율을 나타내는 선도이다. 항력계수(C_D)의 변화율(R_{C_D}) 산출 식,

$$R_{C_D} = \frac{C_{D_{Single}} - C_{D_{Type-i}}}{C_{D_{Single}}} \times 100(\%) \quad (5)$$

전방차량의 경우 이격거리(D)가 10 m 미만까지는 Single 모델대비 전후방 차량의 저항계수가 모두 낮게 산출되었으나 전방차량의 경우 이격거리(D)가 15 m 이상으로 멀어질 경우 저항계수가 Single모델차량보다 오히려 증가하였다. 후방차량은 이격거리에 상관없이 모든 영역에서 Single모델차량보다 감소하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 차량 간 이격거리(D)가 5 m인 Type-1의 경우 단독 주행차량인 Single 모델에 비해 전·후방차량의 항력저항계수의 값이 각각 7.4%와 28.5% 감소되었다. 그러나 차간 이격거리(D)가 30 m인 type-6에서는 항력저항계수의 값이 전방차량의 경우 6.1%증가하였고 후방차량에서는 22% 감소하였다. 이러한 결과는 주행 시 차량의 이격거리(D)가 가까울수록 전방차량의 후면에 생성되는 와류에 의한 유도저항과 후방차량의 전면에 걸리는 압력저항의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9에서는 차간 이격거리(D) 변화에 따른 양력계수(C_L)의 변화를 분석해 보았다. 차간거리가 멀어질수록 전·후방차

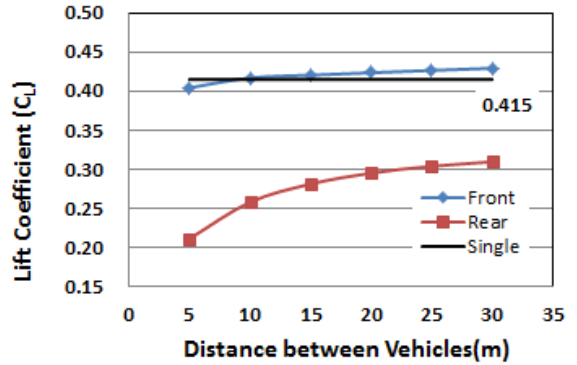


Fig. 9 Variation of the average lift coefficient(C_L) with the distance(D) of the model vehicles

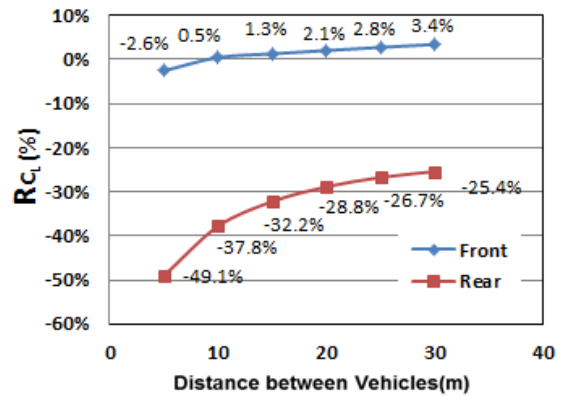


Fig. 10 Reduction rate of the lift coefficient (C_L) of each model with respect to the Single model

량 모두 양력계수가 증가 한다는 사실을 알 수 있다. 차량의 이격거리가 멀어질수록 전방차량의 상단 공기흐름이 후방차량의 영향을 덜 받게 되며 이로 인해 차량상단의 공기흐름이 충분히 발달하여 양력이 증가하는 경향을 나타낸다. 후방차량 역시 전방차량의 후방부 와류현상의 영향을 덜 받게 되어 차량 상단에서 흐름이 발달하여 양력이 증가하게 된다.

Fig. 10은 Single 모델에 대비한 이격거리 변화에 따른 전·후방차량 양력계수(C_L)의 변화율(R_{C_L})을 나타내는 선도이다.

$$R_{C_L} = \frac{C_{L_{Single}} - C_{L_{Type-i}}}{C_{L_{Single}}} \times 100(\%) \quad (6)$$

차간의 이격거리(D)가 증가할수록 전·후방차량 모두 양력계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이격거리가 30 m에서 전

방차량의 경우 Single모델과 비교하여 양력계수가 3.4%로 증가하였으나 후방차량의 경우는 25.4% 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 도로를 주행하는 전·후방차량간의 이격거리 변화가 차체에 발생하는 항력 및 양력에 어떤 영향을 미치는가를 알아보았다. 전방차량 후방의 유도저항과 후방차량의 전면에 걸리는 압력저항은 거리가 가까운 5 m인 Type-1에서 가장 낮게 산출되었으며, 양력의 경우에는 이격거리가 30m인 Type-6에서 최대의 양력이 발생하는 것으로 나타났다. 즉 Type-1의 경우가 공기저항이 최소화되지만 양력은 거리가 가까울수록 작아지는 것을 알 수 있었다.

2대의 차량이 일렬 주행을 할 경우;

- (1) 후방차량의 경우 전방차량 후미의 와류영향으로 차량 전면에서의 압력저항이 감소하여 차체의 공기저항이 매우 크게 감소함을 알 수 있었다. 전방차량의 경우 일정한 이격거리(D)까지는 항력이 감소하나 15 m 이상의 거리를 벗어나면 차체 후방에서의 와류가 발달하여 차체의 항력저항이 오히려 증가하게 된다.
- (2) 차량의 접지력에 영향을 주는 양력계수(C_L)의 경우 차체의 이격거리(D)가 작을수록 낮게 나타났으며, 이격거리가 커질수록 양력도 발달한다는 사실을 알 수 있었다. 즉 고속 주행시 차량의 이격거리가 작을수록 전후방차량 모두가 양력이 낮아져 우수한 접지력을 유지하게 된다는 사실을 알 수 있었다.
- (3) 차량이 주행속도를 유지하기 위해서 필요한 소요동력(Load-road power)의 크기는 차간 이격거리(D)가 작을수록 작아진다는 사실을 알 수 있었다. 차량의 주행 안전성만 확보된다면 차간 이격거리가 충분히 가까울수록 연료가

절감될 수 있으므로 수송에너지 절약과 대기환경 개선에 매우 중요한 효과가 있을 것으로 기대된다.

- (4) 차간 이격거리(D)가 작을수록 항력계수(C_D)는 적어지는 반면 후방에 따라오는 차량의 양력계수(C_L) 또한 감소된다. 전방차량과 거리가 멀어질수록 전방차량의 후미에 생성되는 와류현상이 후방차량에 유동장에 영향을 주어 양력계수가 감소하는 것으로 판단된다.

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.
- [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] 2004, Geoffrey M. Le Good and Kevin P. Garry "On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics," 2004 SAE World Congress, March 2004.
- [4] 1996, Barnard, R.H., *Road Vehicle Aerodynamic Design*, Addison Wesley Longman Ltd.
- [5] 2011, *PHOENICS Technical Report (TR/326)*, Concentration Heat And Momentum Limited.
- [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 Corp.