

# 고속주행차량의 후방스포일러 각도변화가 차량의 공력특성변화에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

남상구<sup>1</sup>, 김철호<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 자동차공학과

## A Numerical Study on the Effect of the Rear Spoiler Angle on the Aerodynamic Characteristics of a High-Speed Vehicle

Sang Gu Nam<sup>1</sup>, Chul Ho Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**요약** 한편 수치해석 연구에서는 SAE에서 추천하는 Blunt-body 모델 차량을 대상으로 차량 후방 스포일러의 각도 변화에 따른 차량의 공기역학적 성능 변화를 분석하였다. 후방 스포일러의 각도( $\alpha$ )를 0~30°까지 변화시키며 차체 공력 특성 및 이로 인한 주행안전성의 변화를 분석하였다. 본 연구를 통해 후방 스포일러가 없는 기본 모델(A0)에서는 차체에 양력이 발생하게 되나 스포일러를 작동할 경우 다운 포스가 발생함을 알 수 있었다. 특히 각도( $\alpha$ )가 20°일 때 속도 80km/h에서 스포일러가 없는 차량에 비해 다운 포스가 두 배 이상 발생한다는 사실을 알 수 있었다. 또한 회전구간을 선회 주행 시 차체에 발생하는 원심력에 의한 회전모멘트와 회전저항 모멘트의 분석을 통해 원심력의 크기가 저항 모멘트의 값보다 크게 발생한다는 점을 확인하였다. 압력중심과 중력중심의 위치에 따라 차량에 작용하는 다운 포스의 양이 변화하기 때문에 이를 개선한다면 차량의 주행 안정성 및 공력 성능을 개선하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

**Abstract** This numerical study analyzed the change in aerodynamic performance of a vehicle according to the angle of the vehicle rear spoiler for Blunt-body model vehicles recommended by SAE. The angle ( $\alpha$ ) of the rear spoiler was changed from 0 to 30°, and the body's aerodynamic characteristics and resulting change in driving safety were analyzed. It was found that in the basic model (A0) without a rear spoiler, lift is generated in the body, but when the spoiler was operated, a downforce was generated. In particular, when the angle ( $\alpha$ ) was 20°, it was found that the downforce was more than twice as much as the vehicle without a spoiler at a speed of 80km/h. In addition, it was confirmed that the magnitude of the centrifugal force was larger than the value of the resistance moment generated by the vehicle body during the rotating section. Since the amount of downforce acting on the vehicle changes depending on the position of the pressure center and the gravity center, improving it will help improve the driving stability and aerodynamic performance of the vehicle.

**Keywords** : CFD, Aerodynamic Resistance, Lift Coefficient, Drag Coefficient, Aerodynamic Design, Rear Spoiler, Driving Stability

본 논문은 서울과학기술대학교 산학지원단 연구지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Chul Ho Kim(Seoul National University of Science and Technology)

email: hokim@seoultech.ac.kr

Received July 12, 2022

Accepted October 7, 2022

Revised September 16, 2022

Published October 31, 2022

## 1. 서론

복잡한 난류유동은 주행 중인 차량에 있어 큰 공기저항을 발생시키기 때문에 차량의 설계를 현대에선 유선화된 외형을 통해 공기저항을 감소시키는 방향으로 설계 및 제작이 이루어 지고 있다. 공기저항을 감소시킨다는 건 차량의 연료를 절약하는 경제적인 부분 과 주행풍으로 발생하는 양력 과 항력이 주행 안정성에 영향을 최소화 하는 의미를 갖는다. 그 중 고속으로 주행하는 차량의 경우 차체에 발생하는 공기역학적 힘은 차량의 주행안정성에 큰 영향을 미치게 되는데 Kim 등은 주행안정성에 대한 판단 및 연구로 주행안정성을 판단하는데 회전모멘트와 그에 저항하는 회전 저항 모멘트를 수치해석연구를 통해 산출하는 방법으로 연구를 진행하였으며, 산출된 결과를 통해 다양한 주행조건에서 주행안정성을 판단하였다[1]. Kim은대형 버스에 루프 스포일러의 장착되는 형상에 따라서 공력 및 공조 성능이 달라질 수 있다고 하였다[2]. 또한 차량의 종류 및 스포일러의 형상 및 위치에 따라서 차체에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인하였다[3]. 본 연구에서는 점차 환경적인 문제가 대두됨에 따라 화석연료의 사용에 제한성을 두며 탄소규제로 인한 친환경 연료 차량에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히 전기에너지 및 수소에너지를 사용하는 친환경 차량에 주행안정성 향상과 주행거리 연장을 위한 공기역학적 설계가 개발과정에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 차량에 장착되는 다양한 공력장치들 중 차량 후방에 장착되는 스포일러가 각도변화에 따라 차체에 발생하는 공력특성의 변화를 수치적으로 분석하여 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 본 연구를 진행하였다[4,5].

## 2. 주행차량의 공력특성

### 2.1 차량의 공기역학적 특성

차량 주행 시 주행저항을 받게 되며 주된 주행저항으로는 도로와 타이어 사이의 마찰력에 따른 구름저항, 외부공기에 의한 공기저항, 도로의 경사도에 따른 등판저항 등이 있다. 차체 외부공기에 의한 공기역학적 힘으로 차량의 진행방향과 반대방향으로 작용하는 항력(drag Force), 차량의 수직방향으로 작용하는 양력(lift Force) 그리고 차량의 측면으로 작용하는 측력(side Force)이 존재한다.

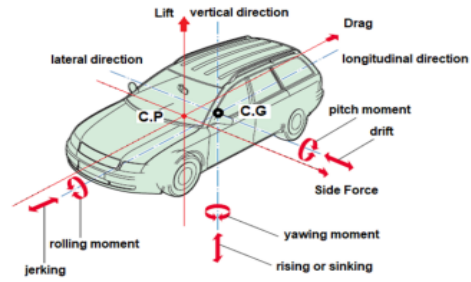


Fig. 1. Aerodynamic forces and moments acting on moving vehicle

후방 스포일러는 차량 후면의 난류 흐름제어를 통해 후방 항력발생을 억제하고 양력제어를 통해 최적의 다운포스를 유지하는 목적으로 사용된다. 다운포스가 증가할수록 주행안정성은 높아지는 반면 타이어와 노면 사이의 마찰력 역시 증가하여 굴림저항(rolling resistance)을 증가시키게 된다.

### 2.2 차체에 발생하는 회전모멘트

외부 바람에 의해 주행 차량의 압력 중심점(center of pressure)에 발생하는 측력, 양력, 항력에 의하여 차체에 회전모멘트가 발생하게 된다[6].

#### 2.2.1 롤링 모멘트(rolling moment)

Fig. 2에서 알 수 있듯이 롤링 모멘트는 차량의 전복(rollover)과 연계되며, 그 크기는 측력( $F_x$ )와 다운포스( $F_y$ )에 의해 산출할 수 있다.

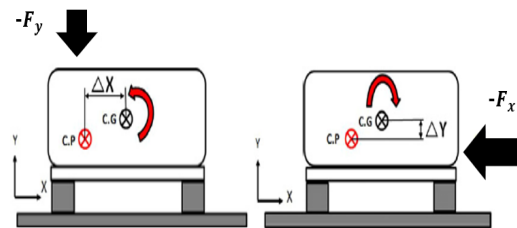


Fig. 2. Rolling moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_r = (-)F_y \Delta X + F_x \Delta Y \quad (1)$$

#### 2.2.2 요잉 모멘트(yawing moment)

요잉 모멘트는 차량의 차선이탈과 연계되며, 그 크기는 측력( $F_x$ )와 항력( $F_z$ )의 크기에 의해 결정되며 아래

Eq. (2)에 의해 산출할 수 있다.

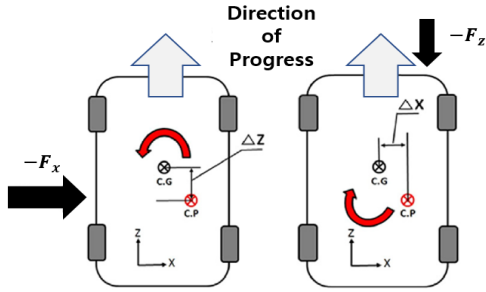


Fig. 3. Yawing moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_y = (-)F_x \Delta Z + F_z \Delta X \quad (2)$$

### 2.2.3 피칭 모멘트(pitching moment)

피칭 모멘트는 차체에 진동 현상을 유발하게 되며 주행안전성의 측면보다는 승객의 피로감과 차량의 수명에 영향을 미치게 된다. 피칭 모멘트는 다운포스( $F_y$ )와 항력( $F_z$ )에 영향을 받으며 아래 Eq.3으로 산출할 수 있다.

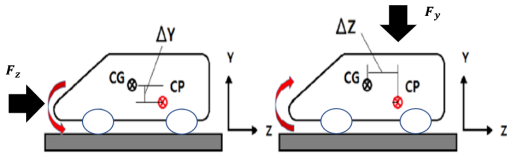


Fig. 4. Pitching moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_p = (-)F_z \Delta Y + F_y \Delta Z \quad (3)$$

## 2.3 차량에 발생하는 회전 저항모멘트

차량의 주행 안전성(driving stability)에 영향을 미치는 회전모멘트를 극복하기 위한 저항하는 회전저항모멘트(rotational resistant moment)는 차량의 중량에 의해 결정된다[3].

### 2.3.1 롤링저항모멘트( $M_r$ )

롤링 모멘트에 저항하는 롤링 저항모멘트는 차체의 중량에 의해 결정된다. Fig. 5에서 차체의 무게중심점(center of gravity)을 중심으로 발생하는 회전 저항모멘트의 크기를 산출하는 이론을 정리할 수 있다.

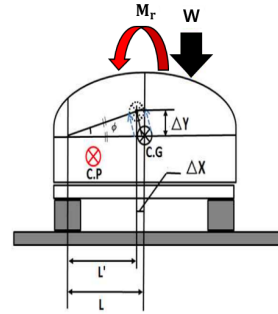


Fig. 5. Rolling resistance moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_{rr} = (W \pm F_D, F_L) L(L') \quad (4)$$

Where,  $L' = L \cos \theta$

$$\Delta X = L - L'$$

$$\Delta Y = L \sin \theta$$

### 2.3.2 요잉 저항모멘트( $M_{yr}$ )

요잉 모멘트에 저항하는 모멘트는 지면과 타이어 표면에서 발생하는 마찰력으로써 차량의 중량, 공기역학적 힘에 의해 결정된다. 두가지 요소로 결정된 저항모멘트는 차량의 무게중심에서 발생하는 요잉모멘트를 상쇄하게 되는데 이는 요잉 모멘트의 값이 복원하는 힘보다 큰 경우에는 차량은 주행안전성을 상실하게 된다[7].

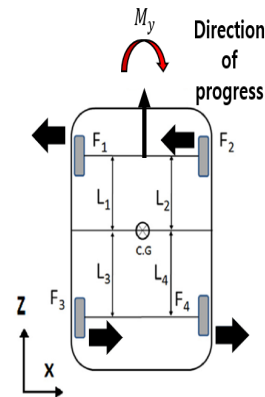


Fig. 6. Yawing resistance moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_{yr} = (F_1 L_1) + (F_2 L_2) + (F_3 L_3) + (F_4 L_4) \quad (5)$$

$$F' = (W \pm F_D, F_L) \mu$$

Where,  $\mu$ : the friction coefficient of the road,

$F'$ : the load acting on a tire

### 2.3.3 피칭 저항모멘트( $M_{pr}$ )

피칭 모멘트에 저항하는 모멘트는 롤링모멘트의 개념과 유사하며 차량의 중량, 공기역학적 힘에 의해 결정된다.

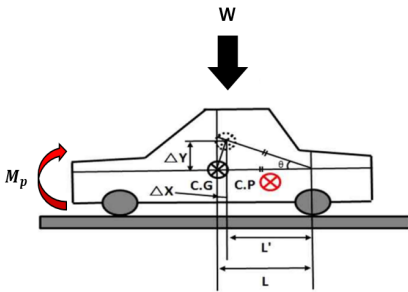


Fig. 7. Pitching resistance moment by aerodynamic force acting on the vehicle

$$M_{pr} = (W \pm F_D, F_L)L(L') \quad (6)$$

Where,  $L' = L \cos \theta$

$$\Delta X = L - L'$$

$$\Delta Y = L \sin \theta$$

### 2.4 선회주행 시 차체에 발생하는 원심력

선회주행 하는 차량은 직진주행과는 차량과 다르게 원심력의 영향을 받게 되며 Eq. (7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$F_c = \frac{W V^2}{g R} \quad (7)$$

Where,  $W$ : total weight of vehicle

$V$ : the vehicle speed

$R$ : the radius of gyration

$g$ : the gravitational acceleration

## 3. 수치해석 접근법

### 3.1 모델차량의 형상 및 제원

본 수치해석 연구에서는 후방스포일러의 공기역학적 영향에 대해 알아보기 위해 차체의 공기역학 연구를 위해 SAE에서 추천하는 대표적인 Bluff-body 모델을 이용하였다. Fig. 8은 본 연구를 위해 사용한 모델 차체의 형상과 제원을 보여준다.

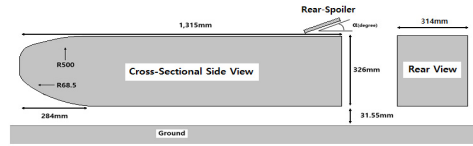


Fig. 8. Geometry of the test model of a bluff-body with a rear spoiler and its dimension

선행연구에서 본 모델을 이용하여 풍동실험을 통해 차체 후방 하단에 설치된 디퓨저의 표면형상 변화에 따른 차체 공력특성 및 지면효과에 대해 알아보았다[8]. 본 연구에서는 디퓨저 형상이 없는 SAE 모델에서 후방 상단에 후방 스포일러를 설치하고 스포일러 각( $\alpha$ ) 변화에 따라 차체에 발생하는 공기역학적 특성을 분석해 보았다.

### 3.2 해석연구를 위한 지배방정식 및 해석조건

유동장 내부의 해석을 위한 공간은 외부 바람이 없는 개방된 공간으로 가정하였으며 유동장 내의 공기유동은 다음과 같이 정의 하였다.

- 3차원 정상유동(Steady 3-D Flow)
- 난류 유동(Turbulent Flow)
- 비압축성 유동(Incompressible Flow)
- 등온유동(Isothermal Flow)

### 3.3 수치해석을 위한 격자생성

수치해석을 위해 CAD-to-CFD 격자 생성법을 사용하였으며, 이를 사용하기 위해 범용 3차원 CAD 프로그램인 Creo(Ver4.0)를 이용하여 모델의 3차원 형상을 생성하였다. 본 형상모델을 수치해석 도메인(numerical domain)으로 불러와 직각 좌표계 상에서 정방 격자(rectangular grid)를 생성하였다.

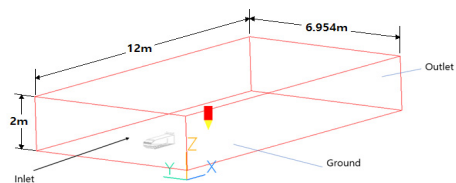


Fig. 9. A numerical domain with test model vehicle (domain size : 12m×6.954m×2m)

Fig. 9는 본 해석연구를 위해 결정한 해석영역의 크기를 나타내며, 해석의 신뢰성을 높이기 위해 모델차량 주

변에 충분한 영역을 확보하여 유동장이 충분히 발달하도록 하였다.

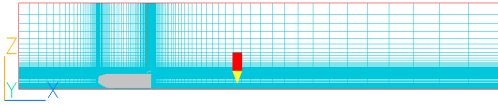


Fig. 10. A typical numerical grid of the simulation model

(140×91×75)

Fig. 10은 유동장 해석을 위해 격자시험(Grid Test)을 통해 생성한 격자의 2차원 형상을 보여주며 검사체적내 해석격자의 최종 크기는 (140×91×75)로 총 955,500개로 구성하였다.

### 3.4 해석을 위한 초기 및 경계조건

차량의 주행조건 변화에 따른 유동현상 해석을 위해 정상유동 시뮬레이션을 진행하였으며 해석연구의 주요 연구변수로 차량의 주행속도와 후방스포일러의 받음각을 변화시켰다. 연구변수의 변화 범위는 아래 Table 1에 주어진 바와 같다.

Table 1. Initial and boundary conditions for the simulation

Parameter	Conditions
1 vehicle speed	80km/h ~ 120km/h
2 rear spoiler angle	0° ~ 30°
3 pressure boundary	ambient condition
4	No-slip condition on the solid surfaces
5	Potential flow condition on the open surface in the control volume

### 3.5 연구의 주요 변수

본 연구의 주요 변수는 차량 후방 상단에 설치되는 스포일러의 각도이며 자세한 제원은 Table 2에 주어진 것과 같다.

Table 2. Test condition of each model for the numerical test

Spoiler Angle	Vehicle Speed
A0(0°)	80km/h 100km/h 120km/h
A10(10°)	
A20(20°)	
A30(30°)	

### 3.6 수치해석을 위한 지배방정식

차체 외부의 공기유동현상 해석을 위해 유한체적법(Finite Volume Method)을 적용한 영국 CHAM사의 PHOENICS(ver.2020)을 사용하였다. 검사체적내의 비압축성 난류 유동장의 해석을 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식을 풀었으며, 난류해석을 위해 표준 모델을(k-ε) 사용하였다. 유동해석의 수렴성 판단을 위해 각 변수들의 계산 잉여율(residual fraction)이 10<sup>-4</sup>% 이하로 떨어질 때 까지 충분히 반복적으로 계산하였다.

비압축성, 난류 유동장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다[9].

(1) 연속방정식(Continuity Equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial y_j} + \frac{\partial U_k}{\partial z_k} = 0 \quad (8)$$

(2) 운동량 방정식(Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - g_i \quad (9)$$

(3) 난류 운동에너지방정식(Turbulent kinetic energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \varepsilon \quad (10)$$

(4) 소산방정식(Energy dissipation equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$$

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

$$G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

(C<sub>μ</sub> = 0.09, C<sub>ε1</sub> = 1.44, C<sub>ε2</sub> = 1.92, σ<sub>ε</sub> = 1.0, σ<sub>k</sub> = 1.0)

## 4. 해석결과의 분석

모델 차량의 주행속도와 후방 스포일러의 각도 변화에 따른 차체 공력특성의 변화는 차량의 연료 경제성과 주

행안정성에 매우 큰 영향을 미친다[9].

#### 4.1 해석 결과의 정성적 분석

Fig. 11는 차량속도 120km/h에서 후방스포일러의 각도 변화에 따른 주변에서의 정압 분포를 보여준다.

차체 전방에서의 압력분포는 유사한 크기를 나타내나 후방에서는 상부에 설치된 스포일러 각도 변화에 따라 차체 후방의 난류강도 변화에 따라 달라지는 것을 볼 수 있으며 또한 스포일러에 작용하는 저항이 증가하는 사실을 보여준다[10]. 이로 인해 스포일러의 각도증가에 따라 공기저항이 증가한다는 사실을 알 수 있다. Fig. 12은 후방 스포일러의 각도 변화에 따른 차체 주변에서의 속도 분포를 보여준다.

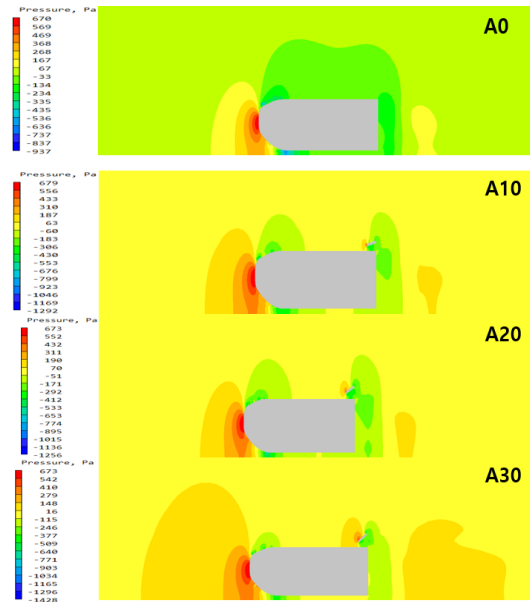


Fig. 11. Variation of pressure distribution around the model vehicle with the spoiler angle( $\alpha$ ) at 120km/h

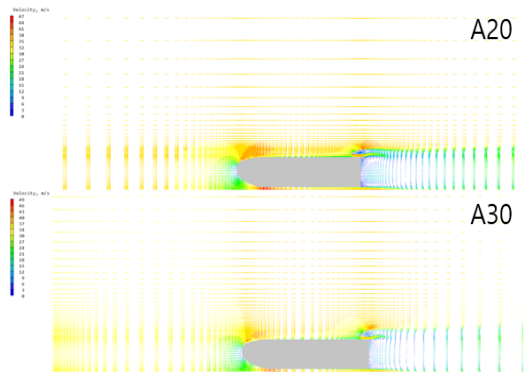
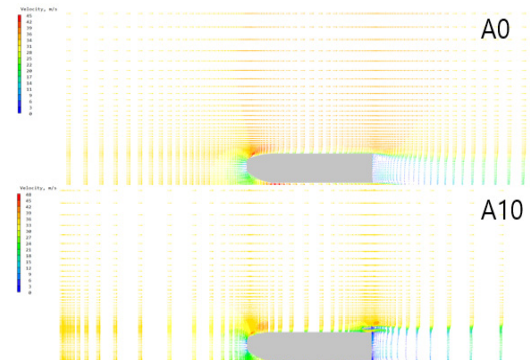


Fig. 12. Variation of velocity distribution around the model vehicle with the spoiler angle( $\alpha$ ) at 120km/h

스포일러의 각도( $\alpha$ )가 커질수록 스포일러 주변에서의 유동이 복잡해지며 이는 차체 후방 와류(rear vortex)에 영향을 미쳐 차량의 공력특성 변화에 영향을 주게 된다 [10].

#### 4.2 해석 결과의 정량적 분석

차체에 발생하는 저항력은 연료경제성에 영향을 미치게 되며 양력은 주행안정성인 회전모멘트에 영향을 미치게 된다.

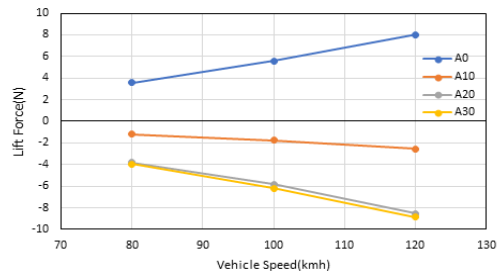


Fig. 13. Variation of lift force with the spoiler angle ( $\alpha$ ) and the vehicle speed

Fig. 13은 차체에 발생하는 양력 혹은 다운포스의 변화를 보여준다. 스포일러가 없는 A0모델에서는 양력이 발생하는 것으로 나타났으나 스포일러를 장착한 결과 모든 각도 영역에서 다운포스가 발생함을 알 수 있다. A0에서 A10에서의 구간에서 가장 큰 다운포스가 발생함을 확인하였으며, A20과 A30의 구간에서 발생하는 다운포스의 양은 큰 증가 폭을 보이지 않았다. 다운포스는 차량의 접지력 향상을 통해 요잉 모멘트에 영향을 미치게 된다.

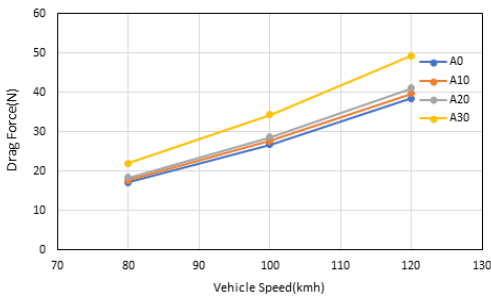


Fig. 14. Variation of drag force with the spoiler angle ( $\alpha$ ) and the vehicle speed

Fig. 14는 스포일러 각도변화에 따른 차체 공기 저항력의 변화를 나타내는 선도이다. 후방스포일러의 각도가 커질수록 저항력이 증가한다는 사실을 알 수있다. A30의 경우 A0 대비 저항의 증가는 연료 경제성에 부정적 영향을 미치나 조향 성능(driving performance)과 주행안정성(driving stability)에는 긍정적인 영향을 미치게 된다. 차량의 항력계수( $C_D$ )는 Eq. (12)에서 알 수 있듯이 항력의 크기에 비례한다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (12)$$

Fig. 15에서 보여주듯이 항력계수의 값은 항력의 크기에 비례하므로 후방스포일러의 각도가 커질수록 높은 값을 갖게된다. 그러나 차량의 속도에는 상관없이 일정한 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다.

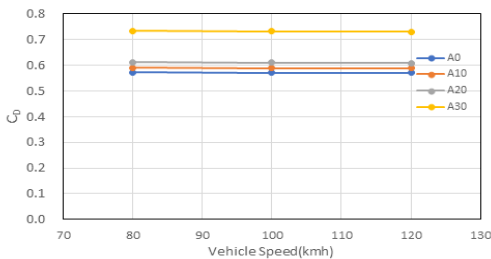


Fig. 15. Variation of drag coefficient ( $C_D$ ) with the spoiler angle( $\alpha$ ) and speed

Fig. 16은 후방스포일러의 각도변화에 따른 차체에 작용하는 양력계수( $C_L$ )의 변화를 보여준다. 스포일러가 장착되지 않은 A0모델의 경우 양력계수가 양(+)의 값이나 스포일러를 장착한 A10~30 모델에서는 양력이 음(-)

의 값으로 다운포스가 발생한다는 것을 의미하며 각도가 증가할수록 다운포스의 크기가 증가하여 이는 차량의 회전운동인 롤링과 요잉모멘트에 영향을 미쳐 주행안정성에 영향을 주게 된다. 양력계수는 Eq. (13)에서 보여주듯이 양력( $F_L$ )의 크기에 비례하므로 차량의 속도에 무관하게 일정하다는 사실을 알 수 있다.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (13)$$

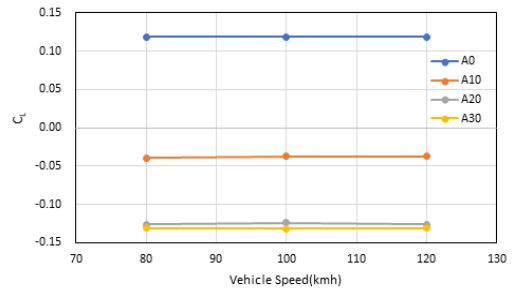


Fig. 16. Variation of lift coefficient ( $C_L$ ) with the spoiler angle( $\alpha$ ) and speed

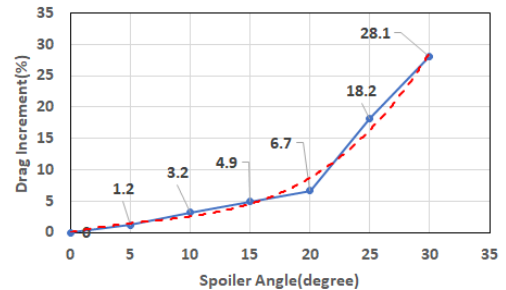


Fig. 17. Increment of drag force( $F_D$ ) with the spoiler angle( $\alpha$ ) at 80km/h

Fig. 17은 차속 80km/h에서 스포일러 각도( $\alpha$ )의 변화에 따른 스포일러가 장착되지 않은 기본모델(A0)대비 항력( $F_D$ )의 증가율(%)을 보여준다. 스포일러 각( $\alpha$ )이 30°일 때 스포일러가 없는 기존모델 대비 28.1%까지 항력이 상승함을 알 수 있다. 또한 스포일러의 각도가 증가함에 따라 항력이 계속 상승하는 것을 추세를 통해 확인하였다.

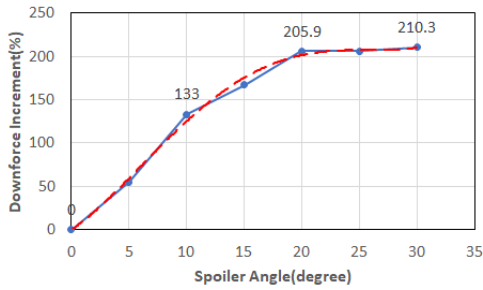


Fig. 18. Increment of down force( $F_L$ ) with the spoiler angle( $\alpha$ ) at 80km/h

Fig. 18은 동일차속에서 스포일러가 없는 기존모델(A0) 대비 다운포스의 증가율을 나타내는 선도이다. 다운포스는 회전모멘트에 저항하는 힘으로 차체의 롤링과 요잉 모멘트에 저항하여 차량의 주행안정성을 높이는데 기여한다. 차속 80km/h에서 스포일러의 각도( $\alpha$ )가 20° 일 때 기존모델(A0) 대비 2배 이상의 다운포스가 발생함을 알 수 있다. 그러나 다운포스는 스포일러의 각도( $\alpha$ )가 증가하더라도 30°를 넘어가면서부터 그 전 구간에 대비 높은 상승률을 보이지 않았으며, 점차 줄어드는 것을 추세를 통해 확인하였다.

## 5. 주행안정성 분석

주행 차량의 주행 안정성의 판단은 차체의 압력중심점에 작용하는 공력(aerodynamic force)에 의한 회전모멘트와 차량의 무게 중심점에 작용하는 중량에 의한 회전 저항모멘트의 크기 비교를 통해 판단하게 된다. 차량이 직진주행 시 그리고 선회주행 시 2가지 조건에서 주행 안전성 판단을 진행하였다.

### 5.1 직진 주행 시 주행안정성 판단

주행안정성 판단을 위한 차량의 안전지수( $I_s$ )는 차체에 발생하는 회전모멘트( $M_r$ )와 회전 저항모멘트( $M_{rr}$ )의 비로 정의하였으며 아래의 Eq. (13)과 같다.

$$\text{Safety Index}(I_s) = \frac{M_r}{M_{rr}} \quad (14)$$

Where,  $M_r$ : rotational moment,

$M_{rr}$ : rotational resistance moment

모델차량의 롤링, 요잉, 피칭 회전모멘트에 대한 주행 안전성 판단기준은 Table 3에 제시된 바와 같다.

Table 3. Stability criterion of the model vehicle

	Stable	Unstable
Rolling moment	$I_{sr} < 1$	$I_{sr} > 1$
Yawing moment	$I_{sy} < 1$	$I_{sy} > 1$
Pitching moment	$I_{sp} < 1$	$I_{sp} > 1$

#### 5.1.1 회전 모멘트 안정성 판단

아래 Table 4-6은 모델차량이 외기가 없는 직선, 수평도로를 80~120km/s의 속도로 주행할 때 모델 차량의 후방스포일러 각도 변화에 따른 차량의 안전지수를 분석한 결과이다.

Table 4. Determining rolling moment stability

Rolling moment	80km/h	100km/h	120km/h
A0	0.005 < 1	0.004 < 1	0.001 < 1
A10	0.007 < 1	0.003 < 1	0.007 < 1
A20	0.002 < 1	0.006 < 1	0.012 < 1
A30	0.021 < 1	0.039 < 1	0.049 < 1
Safety Index	Stable		

Table 5. Determining yawing moment stability

Yawing moment	80km/h	100km/h	120km/h
A0	0.2929 < 1	0.3482 < 1	0.3972 < 1
A10	0.3457 < 1	0.3516 < 1	0.4436 < 1
A20	0.4833 < 1	0.5513 < 1	0.6876 < 1
A30	0.5737 < 1	0.7619 < 1	0.9912 < 1
Safety Index	Stable		

Table 6. Determining pitching moment stability

Pitching moment	80km/h	100km/h	120km/h
A0	0.1513 < 1	0.2304 < 1	0.1971 < 1
A10	0.2304 < 1	0.2545 < 1	0.2781 < 1
A20	0.4833 < 1	0.5668 < 1	0.5842 < 1
A30	0.5737 < 1	0.8317 < 1	0.8586 < 1
Safety Index	Stable		



자료에서 알 수 있듯이 모든 조건에서 차량의 안전지수가 1.0 이하이므로 주행안전성이 확보되었다고 판단된다.

### 5.2 선회주행 시 주행안정성 판단

선회주행의 경우 주행 도로의 회전반경 조건은 국내 자동차 경기장 중 영암 F1 국제 자동차 경기장 1번, 3번 코너의 회전반경인 R12를 모델링하여 안전성을 판단하였다. 후방스포일러가 장착된 차량과 장착되어 있지 않은 차량의 고속 주행조건에서 주행안정성을 판단해 보았다.

$$M_r' < M_{rr} \quad (15)$$

$$M_r' = M_r + F_c \times h \quad (16)$$

Where,  $M_r'$ : total rolling moment

$M_r$ : rolling moment on vehicle

$M_{rr}$ : rolling resistance moment

$F_c$ : centrifugal force generated at (c.g)

$h$ : height of (c.g)

#### 5.2.1 롤링 모멘트 안정성 판단

80km/h에서 스포일러의 각도가 10° 일 때 조건에서 안정성 판단을 진행하였으며, Eq. (15),(16)을 이용하여 판단하였다.

Table 7. Determining rolling moment stability at each angle of attack

A0	$M_r$	$F_c$	$h$	$M_{rr}$
80km/h	0.168	11.208	0.195	2.156
100km/h	0.253	17.513	0.195	2.156
120km/h	0.363	25.219	0.195	2.156
$M_r' < M_{r-m}$		Unstable		

A10	$M_r$	$F_c$	$h$	$M_{rr}$
80km/h	0.537	11.208	0.195	2.156
100km/h	0.841	17.513	0.195	2.156
120km/h	1.210	25.219	0.195	2.156
$M_r' < M_{r-m}$		Unstable		

A20	$M_r$	$F_c$	$h$	$M_{rr}$
80km/h	0.536	11.208	0.195	2.156
100km/h	0.840	17.513	0.195	2.156
120km/h	1.216	25.219	0.195	2.156
$M_r' < M_{r-m}$		Unstable		

A30	$M_r$	$F_c$	$h$	$M_{rr}$
80km/h	0.581	11.208	0.195	2.156
100km/h	0.913	17.513	0.195	2.156
120km/h	1.312	25.219	0.195	2.156
$M_r' < M_{r-m}$		Unstable		

Eq. (15)를 기준으로 판단하였을 때 선회주행 시 80km/h의 속도로는 선회 시 불안정하단 결론이 도출되었으며, 롤링 모멘트의 크기가 비약적으로 증가하거나 혹은 저항 모멘트의 크기가 증가되어야 한다고 판단된다. 또한 선회 주행 시 차량 무게중심에서 발생하는 원심력의 크기가 저항모멘트의 값보다 크게 발생하는 점을 확인 할 수 있었다. 차량의 작용하는 다운포스의 양과 차량무게중심의 위치 및 압력중심의 위치에 따라서 회전모멘트와 저항모멘트의 크기가 변하기 때문에 압력중심의 위치, 무게중심의 위치를 낮출수 있는 공학적인 설계가 있다면 주행안정성에 영향을 미칠 수 있다고 판단되었다.

## 6. 결론

차체에 장착되는 후방스포일러의 각도변화가 차량의 공력특성에 미치는 영향에 관해 수치해석기법을 이용하여 알아보았다. 스포일러의 각도변화에 따라 미치는 항력과 주행안정성에 영향을 미치는 양력의 변화분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 차량의 주행안정성에 영향을 미치는 양력 혹은 다운포스는 후방 스포일러의 각도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 고속주행 차량의 조향성능(driving performance) 과 롤링(rolling) 및 요잉(yawing) 운동제어를 통해 주행안정성(driving stability)의 최적화를 위해 후방스포일러는 중요한 공력부품(aero parts)이라고 판단된다.

- 3) 후방 스포일러의 각도( $\alpha$ ) 제어를 통해 고속주행 차량의 주행 안정성 향상에 기여 할 수 있다.
- 4) 후방 스포일러의 각도( $\alpha$ )가 A10에서부터 다운포스가 발생하며, 최적의 다운포스가 발생하는 각도는 A20인 것으로 확인되었다.
- 5) 차량의 무게중심에서 발생하는 원심력의 크기보다 더 많은 저항모멘트를 만들거나 회전모멘트의 크기를 최대한 작게 하는 것이 차량의 주행안정성 향상에 크게 기여할 수 있다.

## References

- [1] C.H. Kim, C.S. Kim, S.H. Lee, "Development of numerical algorithm for the evaluation of aerodynamic driving stability of a vehicle", Transactions of KSAE, Vol.24, No.3, pp.265-272, 2016.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.7467/ksae.2016.24.3.265>
- [2] M.H. Kim, "A numerical simulation of roof spoiler for aerodynamic and air-conditioning performance improvement in a large-sized bus", Transactions of Ksae, Vol.26, No.5, pp.590-597.  
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.5.590>
- [3] J.M. Kim, "Multidisciplinary Research on the effect of various factors related to rear spoiler application on aerodynamic performance of passenger vehicle", The Koreans Society of science & art Vol.38(2), pp.55-65, 2020.  
DOI: <http://doi.org/10.17548/ksaf.2020.03.30.55>
- [4] U. Ravelli, "Aerodynamic of a 2017 formula 1 car design improvements in freestream and wake flows", Università degli Studi di Bergamo, 2021.
- [5] L. Porcar, W. Toet and P. Javier, G. Montero, "Study of effect of vertical airfoil endplates on diffusers in vehicle aerodynamics", Article MDPI, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/designs5030045>
- [6] M.S. Han, J.U. Cho, "Flow analysis due to the configuration of automotive spoiler" Transactions of KSAE, Vol.24, No.6, pp.673-683, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.6.677>
- [7] W.J. Kong, Y. He, C.H. Kim, "A numerical study on aerodynamic driving characteristics between two vehicles moving opposite direction in high-speed" J. Comput. Fluids Eng, Vol.26, No.3 pp11-17, 2021.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.6112/ksce.2021.26.3.011>
- [8] O. Ehirim, K. Knowles, A. Saddington, M. Finnis, N. Lawson, "On the near-wake of ground effect diffuser with passive flow control", J. of Automotive Technology, Vol.20, Issue 1, pp.11-23, 2019.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12239-019-0002-2>

- [9] J. F. Douglas, Fluid Mechanics, Prentice Hall, 2001, pp.406-447
- [10] G.W Lee, "Effects of Rear Diffuser Size on the Driving Performance of a Passenger Car" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol.20, No.2 pp655-661 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.2.655>

남 상 구(Sang-Gu Nam)

[준회원]



- 2020년 8월 ~ 2022년 8월 : 서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과 열유체 및 CFD연구실 (석사과정)

<관심분야>

전산유체공학, 자동차공기역학설계

김 철 호(Chul-Ho Kim)

[정회원]



- 1996년 3월 ~ 2022년 8월 : 서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과
- 1986년 9월 ~ 1996년 2월 : LG 전자 중앙연구소 책임연구원
- 1983년 2월 ~ 1986년 7월 : 육군 3사관학교 공학부 기계공학과 전임강사

<관심분야>

내연기관설계 및 성능해석, 자동차공기역학설계, 전산유체공학, 풍력터빈설계 및 성능해석, 가스터빈엔진