

## 유선형 고속주행 버스의 공력특성에 관한 실험 연구

김 철 호<sup>\*1)</sup> · 이 승 현<sup>2)</sup>

서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과<sup>1)</sup> · 서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과

### An Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of a Streamline-designed High-speed Bus

Chul-Ho Kim<sup>\*1)</sup> · Seung-Hyun Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

<sup>2)</sup>Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

(Received 21 August 2015 / Revised 14 October 2015 / Accepted 6 November 2015)

**Abstract** : In this study, a wind tunnel test was conducted to measure the aerodynamic characteristics of a streamline-designed high-speed bus with the change of wind direction and speed and the result is compared with the aerodynamic performance of a commercialized high-speed bus model (Model-0) manufactured by Zyle Daewoo Bus Corp. Aerodynamic performance of the existing rear-spoiler was tested to prove its aerodynamic effect on the test model bus. From the study, it was found that 24.6 % of the total drag of the original bus model (Model-0) was reduced on the streamline-designed model bus(model-1) without the rear-spoiler but only 14.3 % of the total drag was reduced with the spoiler on the streamlined model bus. It means that the rear spoiler does not work properly with the streamlined model bus (model-1) and should be noted that an optimum design of a rear-spoiler of a vehicle is important to reduce the induced pressure drag and increase the driving stability of a vehicle against yaw motion. The experimental outcome was also compared to the previous numerical research result to evaluate the reliability of the numerical algorithm of the aerodynamic performance analysis of a vehicle. The error rate (%) of the numerical result to the experimental output is about 5.4 % and it is due to the simplified body configuration of the numerical model bus. The drag increases at the higher yaw angle because the transparent frontal area of the model vehicle increases and the downward force increases with the yaw angle as well. It has a positive effect to the driving stability of the vehicle but the moderated downward force should be kept for the fuel economy of a vehicle.

**Key words** : Aerodynamic drag(공기저항력), Streamlined design(유선형 설계), Pressure drag(압력저항), Induced drag(유도저항), CFD(전산유체역학), High-speed bus(고속주행버스)

### 1. 서론

전 세계적으로 장거리 육상 여행의 수단으로 장거리 고속주행 버스를 활용하고 있다. 우리나라에서도 2012년도를 기준으로 시외버스를 포함하는 장

거리 고속주행 버스의 등록대수<sup>1)</sup>가 45,145대에 이르며 전 세계적으로는 2014년도 기준 약 315,000대의 차량이 생산되어 등록, 운행되고 있다.<sup>2)</sup>

일반적으로 고속주행 차량의 외형을 살펴보면 Fig. 1(a)에서 보는 것과 같이 외형의 일반적인 구조는 직육면체 형태의 박스 형 구조를 갖추고 있지만,

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

본 연구의 유선형 고속주행 버스(Fig. 1(b)) 차량은 전방의 형상 압력저항(profile pressure drag)을 줄이기 위해 방풍유리창(windshield)의 각도를 후방으로 15°정도 까지 꺾어서 설계하였다. 또한 후방의 유도 압력저항(induced pressure drag)을 최소화하기 위해 후방 스포일러(rear spoiler)를 제작, 설치한다.

선행 연구<sup>3,4)</sup>를 통해 알 수 있었던이 측면 및 상, 하부저항을 무시하였을 시 차량이 주행 중 받게 되는 공기역학적 저항력 중 65 % 정도는 차량 정면에 걸리는 형상 압력저항(profile pressure drag)이며, 나머지 35 % 정도는 차량 후방에서 발생하는 공기의 와류현상(vortex)에 의한 유도 압력저항에 기인한다.

차량이 등속주행 시 발생하는 주행저항은 차량의 자중에 의한 도로면과의 구름저항(rolling resistance)과 공기저항(aerodynamic drag)으로 구성된다. 특히 공기 저항의 경우车速이 60 km/h 이상이 되면 급격히 상승하여 구름마찰 보다 커지게 되며 100 km/h에 도달하는 고속주행에서는 구름마찰의 2배가 넘는 공기저항이 차량에 발생하게 된다.<sup>3)</sup> 즉 자동차 엔진에서 발생하는 제동마력의 65 % 이상이 차체가 받는 공기 저항력을 극복하기 위한 동력으로 소모된다. 이러한 관점에서 볼 때 차량 외형의 공기역학적 설계(aerodynamic design)는 수송에너지의 절약에 매우 직접적인 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 선행연구<sup>3,5)</sup>를 통해 알 수 있었던이 차량의 공기역학적 설계의 개념은 소형 승용차와 중, 대형 화물차에서 각각 설계의 목적을 달리하여야 한다. 즉 소형 승용차의 경우는 차량의 주행 안정성(driving stability)에 그리고 중, 대형 화물차의 경우는 연료의 절감

(fuel saving)에 공기역학적 설계의 초점을 두어야 한다.

본 실험연구는 장거리 고속주행 버스의 주행저항 최소화를 통해 연비를 개선하고 유해배기의 배출 최소화를 목적으로 선행의 수치해석 연구<sup>6)</sup>를 통해 개발된 유선형 고속주행 버스의 공력계수인 항력과 양력의 값에 대한 신뢰성 판단을 위해 풍동실험을 실시하였다. 실험연구를 위한 풍동장치는 호주 시드니대학교(The University of Sydney)의 기계항공공학부 풍동실험실에 설치된 밀폐형 아음속 풍동을 이용하였다.

## 2. 실험장치의 소개

### 2.1 실험용 풍동장치의 제원

모델 버스의 공력특성 실험을 위해 검사체적의 크기가 4 ft × 3 ft인 밀폐형 아음속 풍동(closed-type subsonic wind tunnel)을 활용하였으며 풍동의 제원은 Table 1에 주어진 바와 같다. 공력측정을 위해 3축 6-component (3개의 힘 성분과 모멘트와 3개의 힘) 전자저울을 적용하였다. 본 실험연구에서는 2개의 힘(drag, lift)성분과 1개의 모멘트(yawing moment) 성분을 검출하였으며, 이 결과를 이용하여 유선형 모델차량의 연료경제성(fuel economy)과 동적 주행 안정성(dynamic stability)을 판단하는 자료로 활용할 수 있다.

Fig. 2는 본 실험연구에 적용한 실험용 풍동장치의 구성도를 보여준다. 바람의 흐름 방향은 시계방향이며, 검사부(test section)에서 모델차량의 무게중심부(center of gravity)에 단축지지 봉(single strut)을 이용하여 전자저울의 지지축에 모델차량을 고정하였다.

Table 1 Specification of the closed-type subsonic wind tunnel for aerodynamic experiment

Wind speed	2 m/s ~ 48 m/s (7.2 km/h ~ 172.8 km/h)
Reynolds No. range	$3 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$
Test section (WxL)	4ft × 3ft

### 2.2 3축 전자저울의 제원

본 실험연구에 사용된 전자저울은 6개의 로드 셀(load cell)이 장착되어 3방향의 힘 성분( $F_x, F_y, F_z$ )과

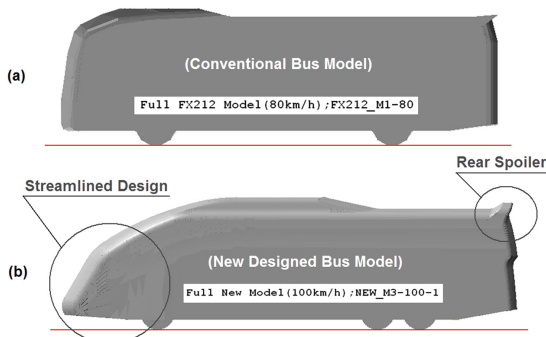


Fig. 1. 2-Dimensional view of the model buses: (a) Conventional model (b) Streamline-designed model

Table 2 Sensing range and its resolution of the load cells

Calibration	Fx, Fy (N)	Fz (N)	Tx, Ty Tz (N·m)	Fx, Fy (N)	Fz (N)	Tx, Ty Tz (N·m)
SI-330-30	330	990	30	0.125	0.25	0.0075
SI-660-60	660	1980	60	0.25	0.5	0.015
	SENSING RANGES			RESOLUTIONS		

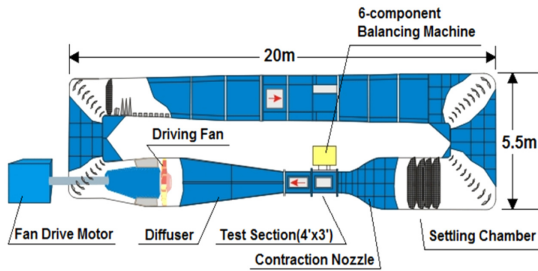


Fig. 2 Overview of the wind tunnel and its dimension

3방향의 회전모멘트 성분( $M_x, M_y, M_z$ ) 측정이 가능한 정밀 전자저울이다. Table 2는 6분력 로드 셀의 측정 범위와 정확도를 나타낸 것이다.

위의 6분력 전자저울을 이용하여 모델 차량의 속도변화에 따른 차체의 중력중심(C.G.)점에 작용하는 3방향의 힘 성분인 항력(drag), 양력(lift), 측력(side force)과 3축 상의 회전모멘트인 롤링모멘트(rolling moment), 피칭모멘트(pitching moment), 요잉모멘트(yawing moment)를 측정하였다.

Fig. 3은 모델차량의 공력특성 측정을 위해 단축 지지 봉(single strut)을 이용하여 전자저울의 지지축에 모델차량의 중력중심(C.G.) 점을 고정하여 풍동의 검사부에 설치한 그림이다.

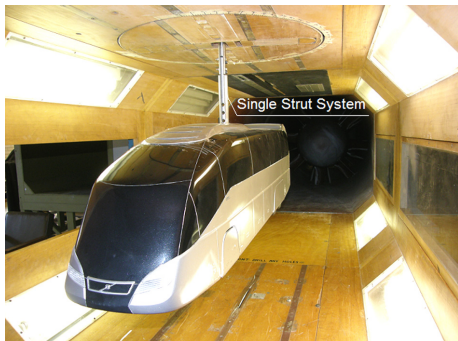


Fig. 3 A model vehicle attached to the single strut system connected to the six-component F/T load cell

### 3. 모델차량의 제원 및 주요 실험 변수

#### 3.1 모델차량의 제원

본 실험연구에 적용한 모델차량은 국내 ㈜자일대우버스의 FX-212모델을 기본형상으로 기하학적 유사성(geometry similarity)을 유지하며 외형의 치수를 1/10배로 제작하였다. 또한 개선모델로서 공기저항 최소화를 위해 전방의 형상을 유선형 형상으로 변형하여 설계, 제작하였다. 차량후방의 공기 유도저항(induced drag)을 최소화하기 위해 기존차량에 장착된 동일한 형태의 후방 스포일러를 제작하여 장착하였다. 풍동실험을 위한 모델차량의 크기는 실물차량의 1/10 축소모형 이하가 될 경우 실험결과에 대한 신뢰성이 낮아지므로 일반적으로 풍동실험에서 모델의 크기를 실제 형상 크기의 1/10 축소모형 이상으로 유지하기를 권장한다.<sup>7)</sup>

선행연구<sup>6)</sup>로부터 기본형 버스모델(Model-0)과 유선형 버스모델(Model-1)의 공기저항계수( $C_D$ )는 각각 0.457과 0.370로 각각 산출되었다.

Original model(Model-0)



Test model(Model-1)



Fig. 4 Comparison of the body shape of the original model and the streamlined model

#### 3.2 실험의 주요 변수

풍동실험을 통해 유선형 모델버스의 공력특성을 분석하기 위해 주요 변수실험을 수행하였다. 기초 실험에서는 외부 바람이 없다는 조건하에서 차량의 주행속도 변화에 따른 차체의 항력, 양력 그리고 요잉모멘트를 측정하였다. 또한 측풍(side wind)하에서 차량이 주행한다는 가정 하에 요각도의 변화에 따른 공력특성의 변화를 측정하였다.

요각도는 풍동장치의 검사부 크기의 제약으로 최대 20°까지 실험하였다.

#### 3.3 실험결과의 분석

모델버스에 작용하는 공력은 차량의 표면에 수직

Table 3 Important parameters and their ranges for the experiment

Wind speed in test section	6 m/s ~ 35 m/s
Rear-spoiler	with/without
Yaw angle with wind direction	0°, 5°, 10°, 15°, 20°

방향으로 작용하는 정압과 수평방향으로 작용하는 점성력에 의해 결정된다. 본 실험에서는 위에서 언급한 전자저울을 이용하여 공기력(항력, 양력)을 측정하였으며, 다음 공식을 이용하여 차량의 항력계수( $C_D$ ) 양력계수( $C_L$ )을 산출하였다.<sup>7)</sup>

- 항력계수(Drag coefficient,  $C_D$ );

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho_{air} A_{x-dir} V^2} \quad (1)$$

- 양력계수(Lift coefficient,  $C_L$ );

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho A_{x-dir} V^2} \quad (2)$$

여기서  $A_{x-dir}$  ( $=0.077m^2$ )는 모델 차량의 정면 투영면적의 크기이고,  $\rho_{air}$ 는 공기의 밀도,  $V$ 는 차량의 속도다.

차체 항력 감소에 따른 차량 구동동력의 절감( $P_{sav}$ )은 다음과 같다.

$$P_{SAV} = (F_{D_{ori}} - F_{D_{str}}) \times V \quad (3)$$

여기서

- $P_{sav}$  : 절감된 제동 출력(kW)
- $F_{D_{ori}}$  : 일반 버스 모델의 항력(kN)
- $F_{D_{str}}$  : 유선형 버스 모델의 항력(kN)
- $V$  : 모델 버스의 속도(m/s)

이다.

#### 4. 연구결과 및 고찰

본 실험연구에서는 공기저항 최소화를 위해 설계된 유선형 고속버스의 주행조건 변화에 따른 공력 특성 변화를 분석하였다. 또한 기본 모델(Model-0)과의 비교를 통해 유선형 고속버스의 공력특성 변화를 평가하였다.

#### 4.1 차속변화에 따른 공력특성의 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 스포일러가 장착되지 않은 유선형 버스가 측풍이 없는 공간을 등속 주행할 때 차량 속도의 변화에 따른 항력계수( $C_D$ )와 양력계수( $C_L$ )의 변화를 보여준다. 유동장이 발달하지 않은 낮은 속도영역에서는 항력계수가 다소 변화하나 정상속도에서는 0.33 정도에 수렴함을 알 수 있다.

양력계수의 값은 차속의 증가와 더불어 감소하다가 순간 증가하는데 이는 상부와 하부의 압력의 변화로 인한 양력 계수의 변화로 판단되며, 평균 0.434 정도의 값이 됨을 알 수 있었다.

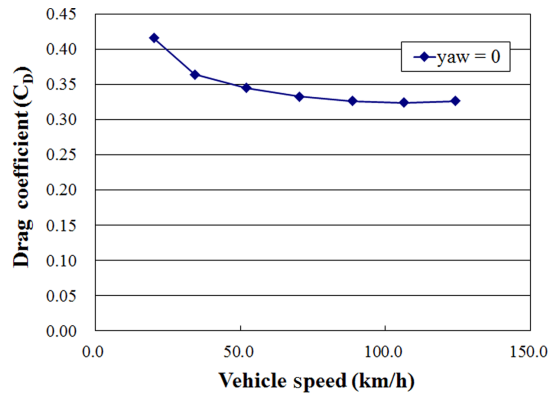


Fig. 5 Variation of  $C_D$  of the streamlined bus with the vehicle speed; without rear-spoiler

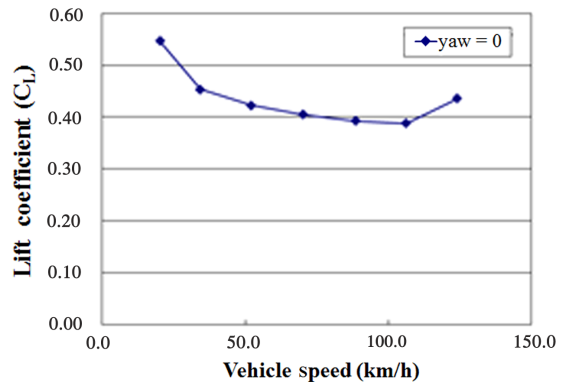


Fig. 6 Variation of  $C_L$  of the streamlined bus with the vehicle speed; without rear-spoiler

#### 4.2 요각도 변화에 따른 공력특성의 변화

Fig. 7은 요각도의 변화에 따른 차량의 항력계수( $C_D$ ) 값 변화를 보여준다. 차량에 불어오는 측풍의

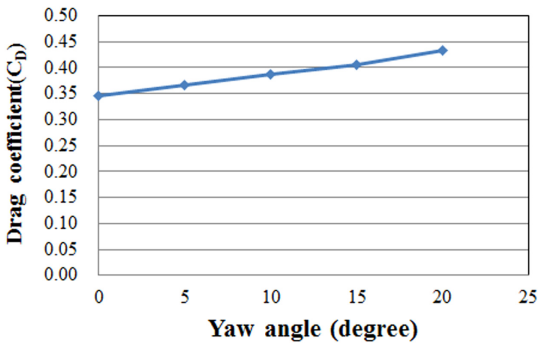


Fig. 7 Variation of  $C_D$  of the streamlined bus with the yaw angle; without rear-spoiler

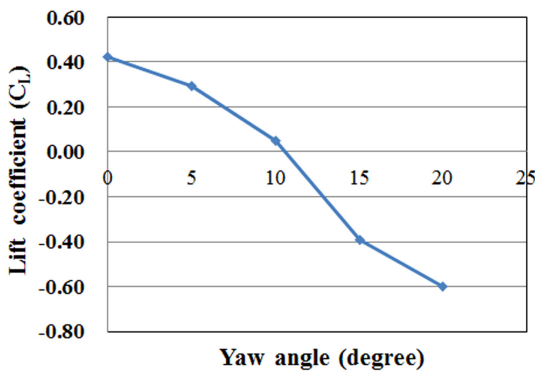


Fig. 8 Variation of  $C_L$  of the streamlined bus with yaw angle; without rear-spoiler

각도인 요각도가 증가할수록 투영면적의 증가로 인해 항력이 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 요각도의 변화에 따른 양력계수의 변화를 보여준다. 양력계수는 감소하는 경향을 보이며 요각도가  $10^\circ$  이하에서는 양력계수가 (+)의 값으로 양력이 발생함을 알 수 있으나,  $10^\circ$  이상이 되면 다운포스가 발생함을 알 수 있다. 다운포스는 상부의 압력이 하부의 압력보다 클 때 발생하는 공기력으로, 발생할 경우 차량의 구름 마찰력의 증가로 주행 저항이 증가하게 되며 연비를 저하시키는 면은 있으나 요잉 회전모멘트에 대한 저항력을 증가시켜 차량의 주행안전성에 긍정적 효과를 나타낼 수 있다.

#### 4.3 후방 스포일러가 차량의 공력특성에 미치는 영향

실험연구에서는 Model-0 버스에 장착되어있는 기존형상의 후방 스포일러가 유선형 버스에 어떠한

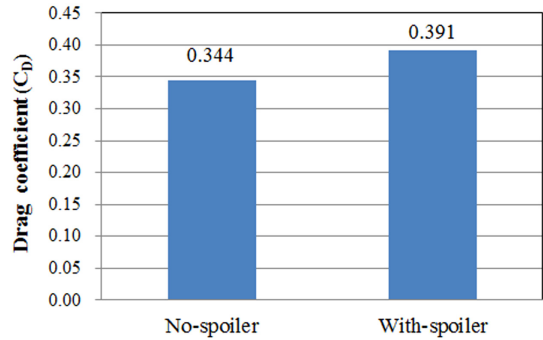


Fig. 9 Effect of the rear-spoiler on  $C_D$  of the streamlined bus(Model-1) at yaw angle = 0

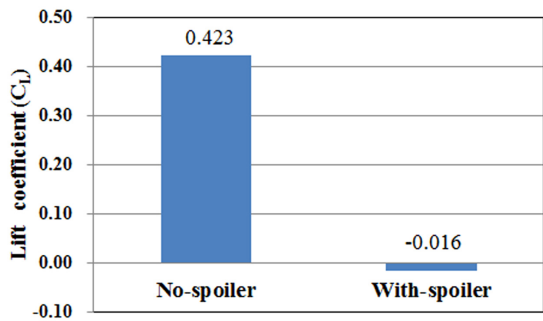


Fig. 10 Effect of the rear-spoiler on  $C_L$  of the streamlined bus(Model-1) at yaw angle = 0

영향을 미치는지를 알아보았다. 이를 위해 기존형상의 축소모델 스포일러를 제작하여 유선형 모델버스에 장착하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 유선형 고속버스 모델에 기존형상 스포일러의 장착 유무에 따른 차량의 항력과 양력계수의 크기 변화를 비교한 결과이다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 기존형상의 후방 스포일러를 유선형 버스에 장착한 경우  $C_D$ 가 오히려 13.7% 정도 증가함을 나타내었다. 이는 기존형상의 스포일러가 후방에서 발생하는 유도저항을 저감시키는데 작용하지 못하고 스포일러의 높이가 높아져 투영 면적이 증가하여 압력저항의 증가를 초래한 것으로 판단된다. 이와 같이 고속차량의 후방 스포일러는 차량의 형상과 주행특성에 맞추어 설계되지 못할 경우 오히려 차량의 운행에 방해적인 요소를 작용할 수 있음을 보여준다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 스포일러가 장착되지 않은 유선형 차량의 경우는 양력이 발생함을 알 수

있으며 스포일러를 장착할 경우에는 미약하나마 다운포스가 발생함을 알 수 있다. 선행연구<sup>6)</sup>에서 보여 주었듯이 일반적인 대형 상용차량이 고속주행을 할 때 발생하는 다운포스에 의해 도로와의 접지력 증가로 차량의 주행안정성에 효과적 측면이 있는 반면, 스포일러를 장착할 경우에는 오히려 양력이 발생하게 되어 구름마찰력의 감소는 기대할 수 있으나 주행안정성에는 부정적 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 후방 스포일러의 최적화 설계는 고속 주행 차량의 주행 저항과 주행 안정성에 매우 큰 영향을 미치므로 차량의 형상과 운행 특성에 적합한 후방 스포일러의 개발 및 장착이 매우 중요하다고 판단 된다.

#### 4.4 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교

Fig. 11은 선행연구<sup>6)</sup>의 시뮬레이션과 실험을 통해 각각 도출한 스포일러가 장착된 유선형 버스의 항력계수 값을 상호 비교한 결과이다. 실험결과 값은 0.391인 반면 시뮬레이션의 결과 값은 0.370으로 산출되었으며 시뮬레이션의 결과가 실험에 비해 5.4% 정도의 오차가 있음을 보여준다.

오차의 원인으로는 시뮬레이션에서는 차체 표면의 거칠기를 고려하지 않은 단순 no-slip 경계조건으로 가정하였으나 실험에서는 실제 모델 차량의 표면 거칠기가 존재하므로 점성저항의 예측에서 오차가 발생하였다고 판단되며, 또한 시뮬레이션에서는 차량의 형상을 간단화하여 차체와 타이어 사이의

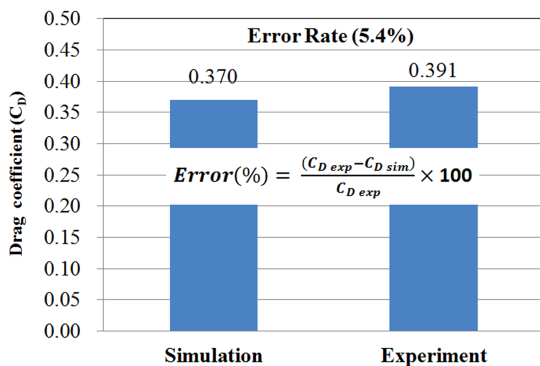


Fig. 11 Error rate (%) of C<sub>D</sub> of the simulation result to the experimental output on the streamlined bus with the spoiler

공간이 없는 것으로 가정하였으나 실험을 위한 모델차량에서는 간격이 존재하므로 차체에 발생하는 압력저항의 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4.5 유선형 버스의 공력특성 분석

Fig. 12는 실험결과를 통해 도출된 후방 스포일러 장착 유무에 따른 유선형 모델버스(Model-1)의 항력계수를 비교한 선도이다.

스포일러를 장착하지 않은 유선형버스(Model-1)의 경우 일반 버스(Model-0)에 비해 24.6% 정도 저항계수가 감소하였으며, 스포일러를 장착한 경우 역시 14.3% 정도의 공기저항계수가 감소하였음을 알 수 있다.

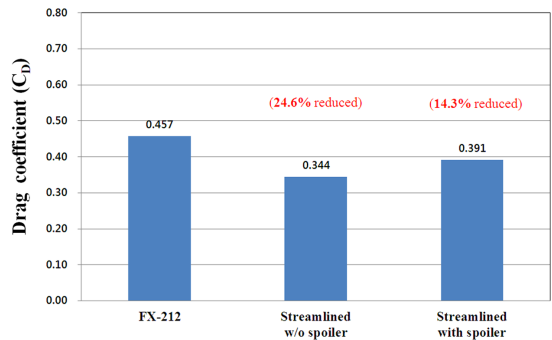


Fig. 12 Comparison of C<sub>D</sub> of each model bus

### 5. 결론

본 연구에서는 유선형 고속버스(Model-1)의 주행 조건변화에 따른 공기역학적 특성변화를 1/10 축소모델의 풍동실험을 통해 알아보았다. 또한 현재 상용화되어 운행 중인 고속버스 차량(Model-0)과의 공력성능비교를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 설계된 유선형 고속주행 버스(Model-1)의 경우 기존의 고속버스(Model-0)에 비해 후방 스포일러를 장착하지 않은 경우 공기 저항력이 평균 24.6% 정도 감소한다는 사실을 알 수 있었다.
- 2) 기존형상의 후방 스포일러를 유선형 고속버스 모델(Model-1)에 장착할 경우 장착 전에 비해 오히려 공기저항이 10.3% 정도 증가한다는 사실을 알 수 있었다.

- 3) 본 연구에서 알 수 있듯이 차량의 형상변화에 따른 후방의 와류현상(vortex)이 달라지므로 스포일러의 목적을 달성하기 위해서는 차량의 형상에 적합한 최적의 후방 스포일러 설계가 병행되어야 한다는 사실을 알 수 있었다.
- 4) 고속주행 중 측풍이 불어오는 경우 항력이 지속적으로 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 즉 측풍의 세기가 커질수록 주행저항이 증가하여 차량의 연비는 저하된다는 사실을 알 수 있었다.
- 5) 양력의 경우는 측풍의 세기가 증가할수록 감소하였으며 이는 차량의 구름저항을 증가시켜 차량의 연비를 저하시키는 역할을 하는 동시에 차체의 요잉 회전모멘트에 저항하는 에너지를 높여 주행안정성을 높이는 역할을 하게 된다. 그러므로 차량의 유선형 설계 시 이러한 측면을 고려하여 최적의 다운포스가 발생하도록 차량의 형상을 설계하는 것이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원 사업으로 수행된 연구결과이다.

## References

1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport,

Molit Statistics System, Total Registered Motor Vehicles, <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/stat-FileView.do>, 2015.

2) The International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Production of Buses and Coaches, <http://www.oica.net/production-7>, 2014.

3) C. H. Kim, D. G. Yun and C. M. Lee, "Numerical Study on an the Aerodynamic Effects of a Rear-side Spoiler on the Driving Stability of a Passenger Car," Journal of SNUT, Vol.47, 1998.

4) C. H. Kim and C. B. Youn, "Aerodynamic Effect of Roof-fairing System on a Heavy-duty Truck," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.3, pp.221-227, 2005.

5) C. H. Kim and J. Y. Cha, "A Numerical Study on an Aerodynamic Effect of a Roof-Fairing System of a Heavy-duty Truck," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1499-1505, 2002.

6) C. H. Kim, "A Streamlined Design of a High-speed Coach for Fuel Savings and Reduction of Carbon Dioxide," International Journal of Automotive Engineering of JSAE, 20114633, pp.101-107, 2011.

7) B. B. Jewel, H. R. William and P. Alan, Low-speed Wind Tunnel Testing, 4th Edn., John Wiley & Sons, New York, 1999.