

## 시뮬레이터를 이용한 중형 저상버스의 주행성능 예측

김기수<sup>a</sup>, 김진성<sup>a</sup>, 박영일<sup>a\*</sup>, 이치범<sup>a</sup>

## Driving Performance Prediction for Low-floor Midsize bus Using Simulator

Gisu Kim<sup>a</sup>, Jinseong Kim<sup>a</sup>, Yeong-il Park<sup>a\*</sup>, Chibum Lee<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	17	August	2015
Revised	5	October	2015
Accepted	8	October	2015

## Keywords:

Low-floor Midibus  
Forward simulator  
Backward simulator  
Vehicle performance  
Fuel consumption

## ABSTRACT

In this study, the performance of a low-floor midsize bus under development is predicted through simulations. To predict the vehicle's acceleration, maximum speed, and uphill driving performance, a forward simulator which calculates the vehicle power is developed. Also we verify the forward simulator by comparing simulations and test result for benchmarking vehicle. To predict the fuel consumption, we use a backward simulator for a specified road cycle. However, to predict the fuel consumption using the backward simulation the engine fuel-consumption map is needed. The engine fuel-consumption map extracting data from a similar sized diesel engine is used by re-scaling the maximum torque. As a result, we simulate the vehicle's forward performance with a new engine. Further, we simulated the backward performance to optimize the fuel efficiency and gearshift timing.

## Nomenclature

$F_{load}$ : Road load force  
 $V_{veh}$ : Vehicle velocity  
 $F_a$ : Aerodynamic drag force  
 $F_g$ : Grading resistance force  
 $F_r$ : Rolling resistance force  
 $a_{veh}$ : Acceleration of vehicle  
 $m_{veh}$ : Mass of vehicle  
 $\theta$ : Angle of inclination of the road

## 1. 서론

저상버스는 차량 바닥이 낮고 계단이 없기 때문에 장애인은 물론, 노약자, 임산부까지 이용하기 편리한 차량을 말한다. 대중교통 수단인 마을버스나 시내버스를 이용함에 있어 장애인의 이용은 제한적이며 고령화 비율이 높지만 노약자의 사용에는 불편함이 따르고 있어 이의 해결을 위하여 접근성, 친근성, 안락함, 미적설계를 갖춘 저상형 중형버스를 통한 서비스 개선이 필요하다. 중형저상버스는 운영비 절감뿐 아니라 노약자 및 교통약자를 배려한 저상화된 교통시스템의 적용 또는 보급에 적합하다. 또한, 중형 저상버스로 교통약자의 요구와 수송수요에 맞추어 대도시의 대형 저상버스를 대체하거나 보완하여 조합운영 할 수 있는 체계를 구축하는 성과를

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6352  
 Fax: +82-2-948-1651

E-mail address: yipark@seoultech.ac.kr (Yeong-il Park).

언을 수 있다.

현재 중형저상버스에 대한 정부의 정책적 그리고 금전적 지원에 대한 보장이 없는 단계에서 이윤을 추구하는 버스 제조업체의 자발적인 연구개발 참여가 없어 국내에는 자체 기술로 개발된 중형저상버스가 없는 실정이다.

본 연구에서는 디젤엔진이 장착된 중형저상버스 개발을 위하여 벤치마크 차량을 대상으로 기본 성능 분석을 수행하였다. 이 분석 결과를 이용하여 개발하고자 하는 중형저상버스의 설계를 위한 기초 자료를 마련하여 차량의 시뮬레이션을 통하여 새롭게 설계 되는 차량의 성능을 예측하고자 한다. 차량의 가속성능, 차량 주행 속도 및 기어단수에 대한 견인력, 주행저항을 고려한 최대 등판각도 및 최대속도 평가 시뮬레이션을 위하여 전방향 시뮬레이터를 개발하고 주행 사이클을 주행하는 차량의 연비를 예측하기 위하여 후방향 시뮬레이터를 개발하였다. 실제 도로를 주행하는 차량은 경사 때문에 연비 성능에 영향을 받게 되므로 도로 경사에 대한 영향을 고려하기 위하여 도로 경사를 포함하는 주행 사이클을 개발하여 적용하였다.

## 2. 성능 예측 시뮬레이터

### 2.1 전방향 시뮬레이터(forward simulator)

엔진, 변속기, 차량, 운전자, 제어기의 동력전달계 단품별 동적 모델을 구축하고 Matlab/Simulink를 이용하여 전방향 시뮬레이터를 Fig. 1과 같이 개발하였다<sup>1)</sup>.

동력원인 엔진 모델은 엔진 동력계상에서 취득된 연료소비량 데이터를 이용하였다. 초기 입력에 따른 APS(acceleration position sensor) 값과 엔진 속도에 따라 엔진 성능곡선에서 도출한 토크 데이터를 전달하는 구조로 모델링하였다. 변속기는 수동변속기로서 각 단의 기어비를 적용하는 형태로 모델링 하였다. 차량 부하인 차량의 가속저항, 등판저항, 구름저항은 수식 (1)를 이용하여 계산하였고 이를 이용하여 시스템을 구성한다. 물리적으로 동력전달계와 연결된 차량의 등가 관성에 차량 부하 토크를 생성하여 적용하였다. 차량의 주행 속도에 따른 부하를 적용하여 차량의 동역학 모델을 구성한다. Fig. 3은 차량의 동역학 모델의 자유 물체도를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 F_{load} &= F_r + F_g + F_a \quad \text{Road load [N]} \\
 F_r &= C_r m_{veh} g \cos\theta \quad \text{Rolling resistance force [N]} \\
 F_g &= m_{veh} g \sin\theta \quad \text{Grading resistance force [N]} \\
 F_a &= \frac{1}{2} \rho A_f C_d V^2 \quad \text{Aerodynamic drag force [N]} \quad (1)
 \end{aligned}$$

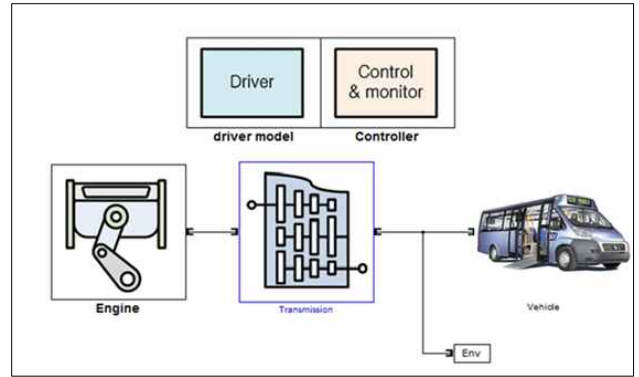


Fig. 1 Forward simulator

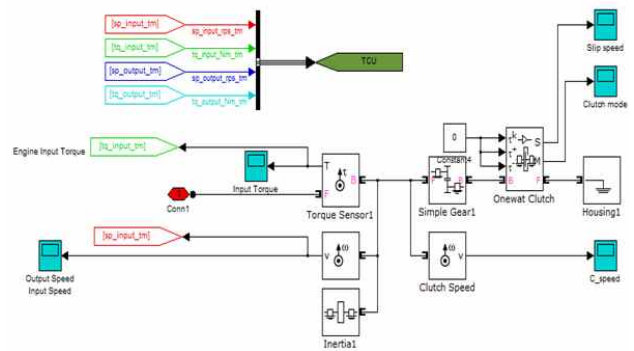


Fig. 2 Matlab/Simulink modeling for transmission

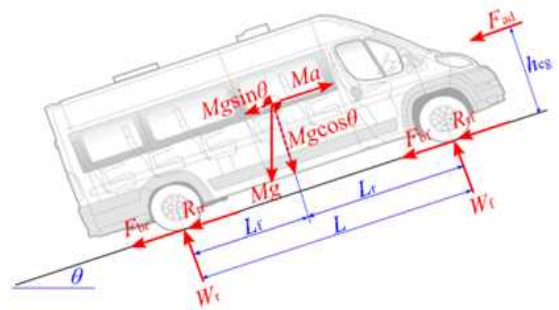


Fig. 3 Vehicle system configuration

운전자 모듈은 Fig. 4와 같이 차량이 지정된 주행 사이클을 달릴 때 현재 차량 속도와 주행 사이클 상의 속도를 비교하면서 가속 페달 혹은 브레이크 페달 신호를 생성하며 피드백 제어를 통해 요구 속도를 구현한다.

### 2.2 후방향 시뮬레이터(backward simulator)

본 연구에서는 주행 사이클에 대한 중형 저상버스의 연비 평가를 위하여 후방향 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 후방향 시뮬레이터는 주행 사이클에 대해 순간 연료 소모량을 누적 계산하여 연비를 도출하도록 구성하였다.<sup>4)</sup> 후방향 시뮬레이션은 출력인 요구 동력을 만족하고 정해진 사이클 동안 최적화 문제를 풀이하며 이를

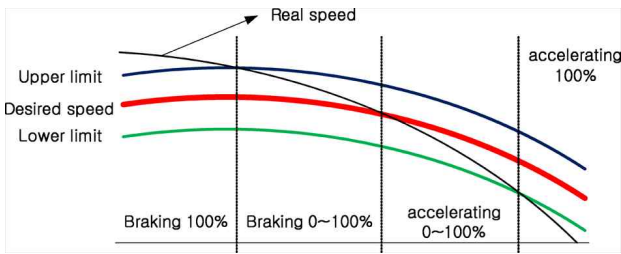


Fig. 4 Principle of driver module

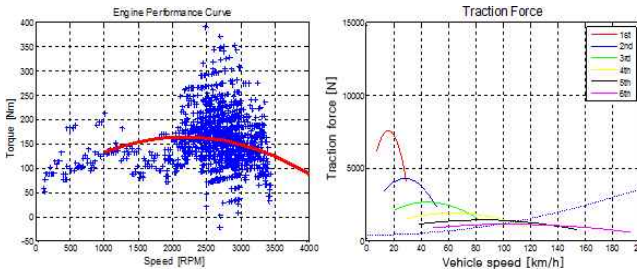


Fig. 5 Engine maximum torque curve from quadratic curve fitting

통해 연료 소모량을 구할 수 있다.

### 2.3 성능 평가를 위한 데이터

벤치마킹 차량 엔진의 실제 성능을 도출하기 위하여 전북자동차기술원(JIAT)에서 실시한 벤치마킹 중형저상버스의 가속 성능 시험 데이터인 Fig. 6의 결과를 이용하여 Fig. 5와 같은 엔진의 작동점 데이터를 얻었다. 실험에서의 엔진 작동점이 full throttle의 실험 조건임에도 엔진의 오랜 사용으로 인한 성능 저하 현상이 뚜렷하여 전형적인 엔진 성능 곡선을 벗어난 작동점이 많이 나타나고 있어 엔진 곡선이 전형적인 형태가 되도록 2차식 curving fitting으로 엔진 성능 선도를 도출하였다. 시뮬레이터에서 사용된 기어의 변속점은 Fig. 5에서 보이는 각 기어 단수별 견인력 곡선의 교차점을 변속점으로 사용하였다.

## 3. 차량 성능시험 결과 및 시뮬레이션 결과

개발한 전방향 시뮬레이터를 이용하여 차량의 가속성능, 차량 최고속도 그리고 등판성능을 시뮬레이션 하였고 개발한 후방향 시뮬레이터를 이용하여 연비 평가를 수행하였다. 이때 차량 제원은 Table 1과 같다.

### 3.1 벤치마킹 중형 저상버스 실차시험 결과

전북자동차기술원(JIAT)에서 벤치마킹 중형저상버스의 가속 성능 및 등판 성능 실험을 실시하였으며 실차 실험 결과는 Fig. 5과 같다. 실차시험은 시험 대상 차량에 부하조건을 적용하여 정지 상태에서 80 km/h까지 full throttle로 가속하는 시험을 수행하였다.

Table 1 Vehicle specification

Final gear ratio	Radius of tire	Eff. of driveline	GVW	Front area	Cd	Cr
4.563	0.366 [m]	90 [%]	4800 [kg]	5.408 [m <sup>2</sup> ]	0.31	0.01
Gear ratio						
Gear ratio	4.167	2.350	1.462	1.047	0.786	0.625

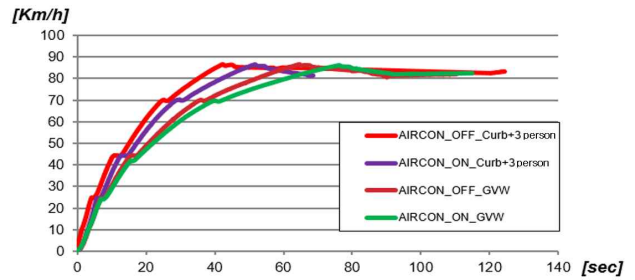


Fig. 6 Test of vehicle acceleration performance

Table 2 Road test for benchmarking Vehicle

Items		Test results			
		CVW+3 people (3.38 Ton)		GVW (5.15 Ton)	
		A/C Off	A/C On	A/C Off	A/C On
Max. speed [km/h]	5 <sup>th</sup>	86.7	86.4	86.4	86.3
Acceleration [sec]	0 - 80 kph	35.0	42.0	52.6	60.6
	3 <sup>rd</sup> 40-80 kph	25.9	30.9	39.0	46.0
	4 <sup>th</sup> 60-Max kph	22.9	29.4	37.5	46.6

Table 2는 각 조건에서의 가속시간을 측정된 것으로 CVW+3인 탑승인 경우에는 시험 결과는 35초이고 GVW인 경우에는 시험 결과는 52.6초를 나타내었다.

### 3.2 벤치마킹 중형 저상버스 시뮬레이션 결과

먼저 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 개발된 시뮬레이터의 검증이 수행되었다. 가속성능 시뮬레이션은 성능시험 조건과 동일하게 각 차량의 부하조건을 적용하여 정지 상태에서 full throttle 가속 수행하였으며 Fig. 7의 점선이 시뮬레이션 결과이다. 실선으로 표시된 실차 시험 결과와 점선으로 표시된 시뮬레이션 결과는 실차시험이 가능한 80 km/h의 속도까지 잘 일치하는 결과를 보이고 있으며 Table 3과 같이 0-80 km 가속시간을 보면 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 결과를 보이고 있어 개발한 시뮬레이터를 검증하기에는 충분하였다.

Fig. 9는 벤치마킹 차량의 시뮬레이션 결과로서 최고속도는 차량의 견인력과 부하선도가 만나는 지점인 108.5 km/h이지만 실제 실험에서는 엔진의 성능이 특히 고속부분에서 성능 저하 현상이

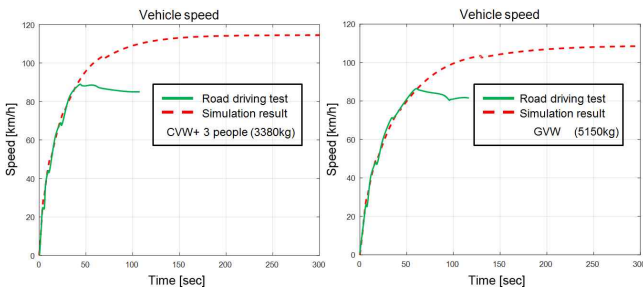


Fig. 7 Result of road driving test and simulation results

Table 3 0-80 km/h acceleration time

	Road driving test	Simulation	Error
GVW	52.6 sec	52.1 sec	0.95%
CVW + 3 people	35 sec	33.5 sec	4.28%

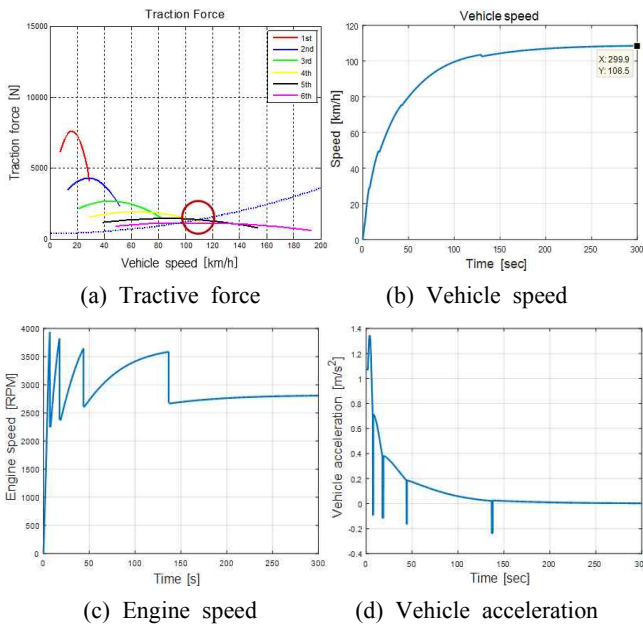


Fig. 8 Simulation results of benchmarking vehicle (old engine) for acceleration performance

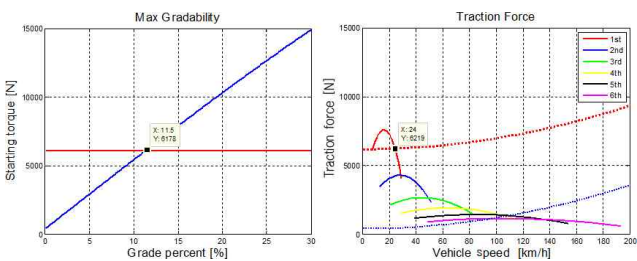


Fig. 9 Simulation results for benchmarking vehicle (old engine) for hill climbing

두드러져 80 km/h 근처로 주행하였다. 또한, Fig. 9는 경사저항을 고려하여 등판 성능을 예측한 결과로서 차량의 최대 등판각도는 11.5%이고 최대 등판각에서 차량의 최대 속도는 24 km/h이었다.

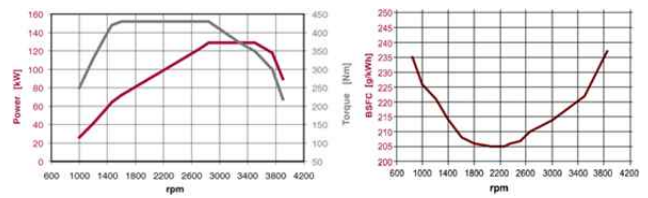


Fig. 10 Engine performance of the target vehicle

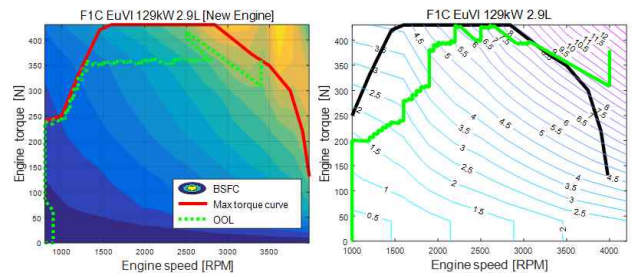


Fig. 11 3D Engine map with BSFC

## 4. 신 엔진을 적용한 개발 중형저상버스 시뮬레이션

### 4.1 개발 차량에 적용하는 신 엔진

제작사로부터 제공받은 개발 차량에 적용되는 엔진의 성능선도와 BSFC (brake specific fuel consumption) 선도는 Fig. 10과 같다. 차량 주행상태에서의 연비 계산을 위해서는 엔진의 각 스로틀에 대한 3차원 선도가 필요하다. 이를 위하여 유사한 성능의 엔진 데이터를 활용하여 3차원 엔진 맵을 Fig. 11와 같이 스케일링하여 구성하였다. Fig. 11에 엔진 최대 토크 선도는 굵은색 실선, OOL(optimal operating line)은 점선 및 실선으로, BSFC는 등고선으로 나타내었다.

### 4.2 개발 중형 저상버스 시뮬레이션 결과

개발 중형 저상버스의 주행 성능 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였고, Fig. 12은 최고속도 및 가속성능 시뮬레이션을 수행한 결과이며, Fig. 12(a)에 그려진 각 점선은 등판각에 대한 주행저항을 의미한다. 신 엔진을 적용한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 벤치마킹 차량의 시뮬레이션과 전반적으로 유사한 특성을 보이고 있으나 기본적으로 엔진의 파워 차이가 반영되어 있다.

개발 차량이 80 km/h까지 도달시간은 16.65초이고 100 km/h까지 도달시간은 24.83초이다. 신 엔진을 적용한 차량 시뮬레이션 수행 결과인 차량 최고 속도는 162.8 km/h로서 이는 벤치마킹 차량인 Merkavim사의 FIAT Ducato에서 제시한 최고 속도 154.5 km/h~165.76 km/h에 부합하는 결과이다. 차량의 최대 등판 각도는 20.8%이고 최대 등판각에서 차량의 최고 속도는 28 km/h로 나타났다. Table 4는 이 결과를 정리한 것이다.



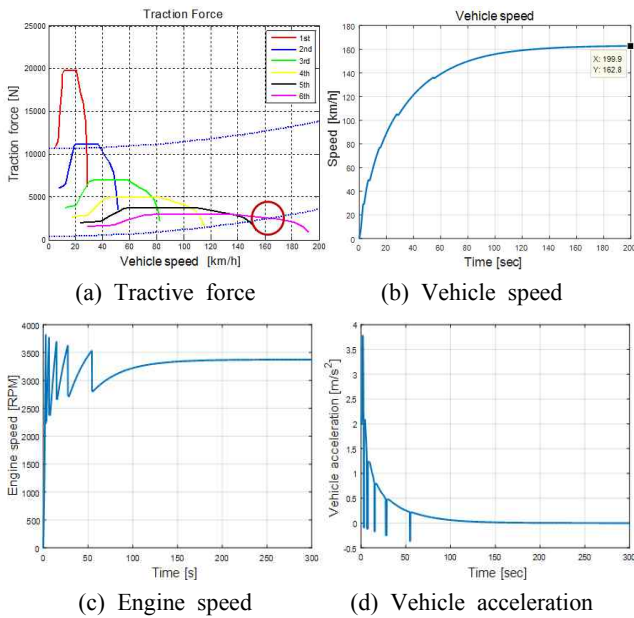


Fig. 12 Simulation results of acceleration performance for vehicle with new Engine

Table 4 Simulation result of vehicle performance

		Developed vehicle (New engine)	Benchmarking vehicle (Old engine)
Acceleration	0-80 km/h	16.65 sec	52.1 sec
	0-100 km/h	24.83 sec	104.4 sec
Maximum speed		162.8 km/h	108.5 km/h
Climbing	grade angle	20.8 %	11.5 %
	Max. speed	28 km/h	24 km/h

## 5. 차량 연비 평가

### 5.1 주행 사이클

개발 차량의 실제 도로 주행시 차량의 연비평가를 위하여 부산에서 버스가 실제 주행하는 Fig. 13과 같은 주행 순환 노선을 적용하여 연비 평가를 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

실제 주행시에는 도로의 경사가 연비에 큰 영향을 미치므로 기존의 주행 사이클에 GPS 데이터를 활용하였으며 GPS 데이터 자체의 오류와 정밀도로 인한 타당하지 않은 경사각을 제거하기 위하여 Low pass filter를 사용하여 과도한 경사를 제거하여 완성하였다. Fig. 14는 완성된 부산 사이클과 각 위치에서의 경사각을 나타낸 것이고 Table 5는 부산 사이클의 특성을 정리한 것이다<sup>[2]</sup>.

### 5.2 차량 연비 평가

후방향 시뮬레이터를 사용하여 연비 평가를 예측하였다. 차량 중량(GVW)을 4,800 kg으로 적용하고 개발 중인 버스에 대해 부산



Fig. 13 Circulation route in Busan

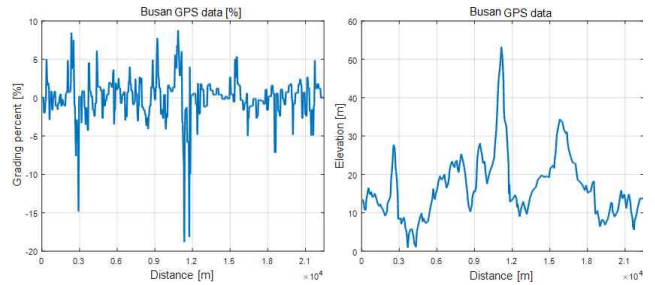
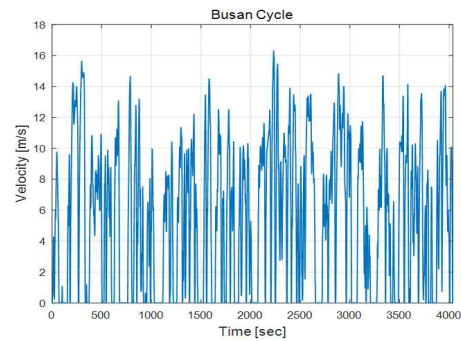


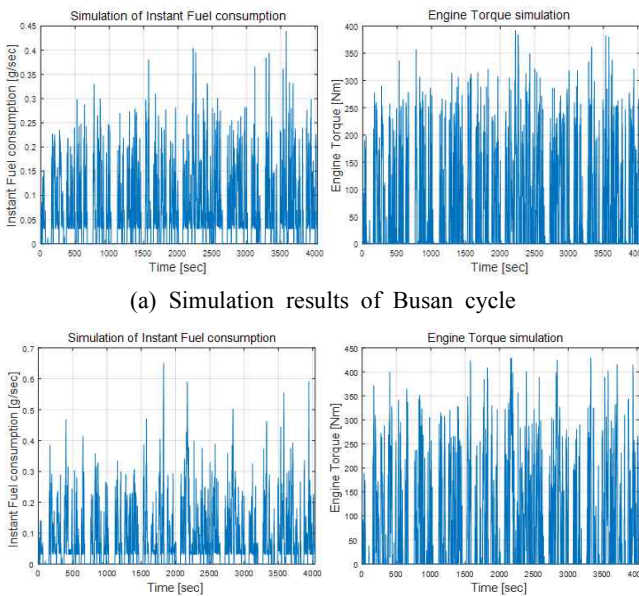
Fig. 14 Busan road cycle with grade

Table 5 Characteristics of Busan road cycle

Driving cycle	Busan
Distance [km]	22.4747
Average vehicle speed [km/h]	26.4321
Max vehicle speed [km/h]	58.752
Average vehicle acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0.232577
Max vehicle acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	1.6
Average vehicle deceleration [m/s <sup>2</sup> ]	-0.2121
Min vehicle deceleration [m/s <sup>2</sup> ]	-1.37
Aggressiveness [m/s <sup>2</sup> ]	0.2299
Deggressiveness [m/s <sup>2</sup> ]	-0.2299

사이클을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 계산된 연비는 7.03 km/l이다<sup>[3]</sup>.

경사를 올라가는 경우에는 주행부하가 커지게 되어 엔진이 저단으로 하단변속을 하고 경사를 내려가는 경우에는 고단으로 상단변속하게 된다. 경사를 고려한 부산 사이클에서의 주행인 경우에는



(a) Simulation results of Busan cycle

(b) Simulation results of Busan (with grade) cycle

Fig. 15 Simulation of instant fuel consumption and Engine torque

Table 6 Backward simulation results

Road cycle	Busan	Busan (with grade)
GVW	4,800 kg	4,800 kg
Fuel economy	7.03 km/l	6.18 km/l
Total driving time	4,036 sec	4,036 sec
Impossible time	0 sec	0 sec

경사가 없는 도로에서의 주행과 운전 상태는 약간의 차이가 있으며 이러한 변속과정이 반영이 된 것으로 약간의 차이를 보이고 있다.

도로의 경사가 반영된 것을 제외하고는 동일한 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 개발버스가 경사를 고려한 부산 사이클을 주행하였다면 연비는 6.18 km/l로서 경사가 없는 주행 사이클 주행보다 13.8% 정도 낮아지는 것을 알 수 있다. Table 6은 연비 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다<sup>2)</sup>.

FIAT에서 공개하는 유사 차종 모델의 연비 11.23 km/l와 동일 주행 사이클과 조건에서 수행한 시뮬레이션 결과는 10.71 km/l로서 개발 후방향 시뮬레이터의 검증이 간접적으로 가능하였다.

### 5.3 최적 기어 변속 맵

Fig. 16은 후방향 시뮬레이션을 통해 부산 사이클을 주행하였을 때 엔진 작동점을 표시한 것이다<sup>3)</sup>. 엔진은 변속을 통하여 최적 연비를 나타내는 OOL 부근에서 작동됨으로서 최적의 연비를 나타내게 된다. 엔진은 각 시간대별 차량의 속도에 필요한 요구되는 엔진토크에 따라 연비 성능이 최적이 되도록 변속을 수행하여 엔진속도를 결정한다.

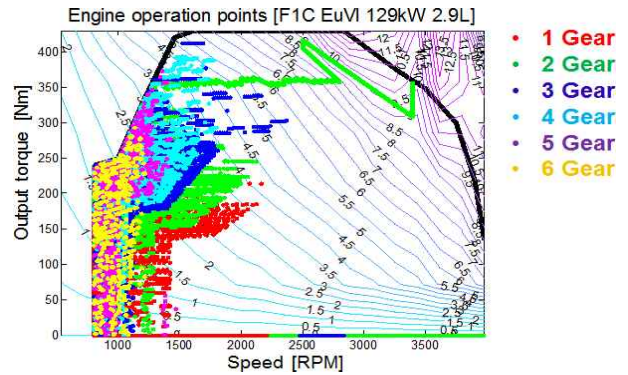


Fig. 16 Engine operating point and optimal shift map

이러한 작동점에 대해 기어 단수별로 구분을 하여 최적의 변속점을 도출할 수 있으며 이는 향후 최적의 변속 전략 적용 시 변속맵으로 사용할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 전방향 시뮬레이터와 후방향 시뮬레이터를 개발하여 시뮬레이션을 통해 벤치마크 차량을 대상으로 기본 성능을 분석하고 신 엔진이 적용된 중형 저상버스의 주행성능을 예측하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 중형저상버스의 동적 구동성능을 예측하기 위하여 전방향 시뮬레이터를 개발하여 실차실험 결과를 통해 시뮬레이터를 검증하였으며, 연비 평가 및 최적 변속 맵을 도출하기 위하여 후방향 시뮬레이터를 개발하였다.

(2) 벤치마킹 중형저상버스와 개발 중형저상버스에 대해 차량 가속 성능, 엔진 성능, 차량 등판 성능 평가를 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 벤치마킹 차량은 엔진의 노후로 인하여 주요 성능에서 신 엔진 장착 차량에 비해 성능의 저하 현상이 나타났다.

(3) 개발 차량에 적용 예정인 신 엔진을 적용한 중형저상버스의 최고 속도는 162.8 km/h이고 80 km/h까지 도달시간은 16.65초, 100 km/h까지 도달시간은 24.83초이다. 또한 등판 성능은 차량의 등판 가능한 최대 경사 각도가 20.8.5%이고 최대 경사각에서 차량의 최대 속도는 28 km/h로 예측되었다.

(4) 차량의 연비 평가를 위해 후방향 시뮬레이션을 수행하였으며 주행 사이클은 부산 사이클로 평가 하였다. 또한 실제 차량의 주행과 유사하도록 부산 사이클에 대해 경사를 포함한 경우의 연비 평가를 수행하였다. 부산 사이클을 주행하였을 때 중형저상 버스의 연비는 7.03 km/l이고 경사가 고려된 부산 사이클 주행시 연비는 13.8% 정도 감소한 6.18 km/l로 예측되었다.

(5) 후방향 시뮬레이션으로 기어 변속을 통한 최적의 엔진의 작동점을 도출하게 되며 이를 이용하면 최적의 변속 맵 도출이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 교통물류연구사업으로 수행 중인 “중형 저상버스 표준 모델 개발(과제번호 13TLRP-B068837-01)” 연구의 일환으로 작성되었습니다.

## References

- [1] Choi, J. D., Lee, D. H., Jeong, J. R., Lee, H. Y., Park, Y. I., Cha, S. W., 2013, Development of Forward Simulator for Analysis of E-REV Bus Performance, Proceeding of KSAE annual conference., 1753-1756.
- [2] Choi, J. D., Jeong, J. R., Park, Y. I., Cha, S. W., 2015, Evaluation of Regenerative Braking Effect for E-REV Bus according to Characteristic of Driving Cycle, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology., 2:2 149-155.
- [3] Choi, J. D., Jeong, J. R., Park, Y. I., Cha, S. W., 2013, Analysis of Engine Operating Point and Fuel Economy for E-REV Bus according to Engine Operation Strategy Using Forward Simulator, Proceeding of KSAE annual conference., 1252-1253.
- [4] Kim, N. W., Park, Y. I., Seo, H. W., Lee, D. H., Cha, S. W., 2009, A Backward Simulator for Calculating Optimal Control Trajectories, Proceeding of KSAE annual conference., 1498-1503.