



연료별 중형버스의 구동성능 및 연비 비교 분석

김 진 성 · 김 기 수 · 박 영 일*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

A Comparative Study on Driving Performance and Fuel Economy Among Different Types of Fuel-based Engines of Mid-size Buses

Jinseong Kim · Gisu Kim · Yeong-il Park*

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea

(Received 5 February 2018 / Revised 18 April 2018 / Accepted 29 April 2018)

Abstract : In this study, both the driving performance and the fuel economy of mid-sized buses were evaluated according to fuel type by using developed simulators that were based on MATLAB software. The expected driving performance of gasoline and CNG-fueled vehicles was compared to a standard of a diesel-fed, mid-sized bus. New powertrain gear ratios for gasoline and CNG-fueled vehicles were designed to have similar driving performance as diesel-fueled engines. Specifically, acceleration, maximum speed, and hill-climbing performance were measured against the standard of a diesel-fed, mid-sized bus. With identical vehicle specifications and similar driving performance, the fuel economy of different types of engines was then analyzed by using the backward simulation of previous studies. The results suggested differences in terms of energy consumption efficiency among various engine types.

Key words : Forward simulation(전방향 해석), Backward simulation(후방향 해석), Fuel economy(연비), Mid-size bus(중형 버스), Optimization(최적화), Vehicle performance(차량 성능)

1. 서 론

최근 미국 예일대와 컬럼비아대 공동연구진이 발표한 환경성과지수에서 한국은 공기질 부문에서 180개국 중 173위로 최하위권으로 언급되었다. 이에 대해 국내에서는 미세먼지에 대한 심각성이 대두되고 있으며, 서울시에서는 대기질 개선 특별대책을 발표했다. 미세먼지의 주요 원인으로 자동차 배출가스가 지목되었으며, 이에 대해 대중교통부문에서 디젤 버스를 CNG 버스로 대체하려는 노력을 기울이고 있다. 또한 V 사의 배출가스 조작 사태의

파장으로 인해 디젤 엔진이 대기오염의 주범으로 재조명되고 있는 상황이다. 그러나 최근 새롭게 발표된 연구에 따르면 CNG 버스가 대기오염물질 배출에서는 디젤보다 유리하지만 온실가스 배출 및 2차 미세먼지 유발이라는 측면에서는 불리하다는 주장이 계속 제기되고 있다. 이에 대해 아직 디젤 버스를 배제하는 정책은 성급한 판단으로 생각되며, 더 많은 연구와 논의가 이루어져야 한다고 생각된다.

기존 많은 연구에서 경유 버스와 CNG 버스의 연비 및 배출가스에 대해 차대동력계를 이용한 실차

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

* This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

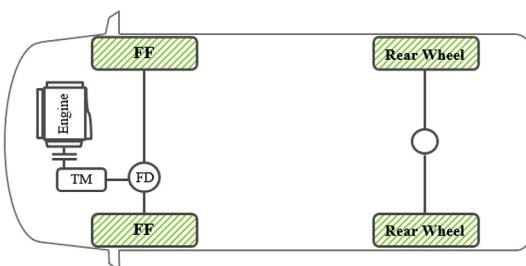


Fig. 1 Configuration of mid-size bus

시험이 수행되었으나 국내 상용차에 대한 배출가스 및 연비 평가 기준이 모호한 상황이며, 시뮬레이션을 통한 평가 자료는 부족한 실정이다.^{1,2)}

그동안 국내의 대형 버스에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만 중형 버스에 대한 연구는 미미한 실정이다. 이에 대해 중형버스에 대한 구동성능 및 연비 평가를 수행하고, 연료 변화에 따른 가솔린, 디젤, CNG 엔진의 에너지 소비 효율의 차이를 비교 분석하는 것이 필요한 상황이다.

선행 연구에서는 디젤 중형버스의 개발 시 필요한 선행 과정으로써 전방향 모델과 후방향 모델을 개발하여 구동성능 및 연비해석을 수행하였다.^{3,4)}

본 연구에서는 중형저상버스의 연료 변화에 따른 차량의 구동성능을 평가하고 이를 기준으로 연료 변화에 차량의 연비 평가를 수행하였다.

2. 해석을 위한 중형 버스 모델링

2.1 연료 종류에 따른 엔진맵 구성

선행 연구를 통해 개발 차량에 적용될 디젤 엔진을 3차원 맵으로 구성하였으며, 이를 시뮬레이션에 적용하여 개발 차량의 주행 성능 및 연비 평가를 수행하였다.³⁾ 가솔린 엔진 및 CNG 엔진을 적용한 결과를 기존 시뮬레이션 결과와 비교 분석하기 위해서는 동력원 데이터 확보 및 기준 엔진과 동급 엔진으로 구성하는 것이 필수적이다. 연비 평가 시뮬레이션을 위해 필수적인 동력원 데이터는 미국 Argonne National Laboratory에서 개발한 상용 해석 프로그램인 Autonomie에서 추출하였다.⁵⁾ 추출한 가솔린 및 CNG 엔진 데이터를 기준 디젤 엔진 출력에 맞추기 위해 스케일링 기법으로 재구성하였다. 엔진 맵은 준정적 상태 데이터로써 엔진의 최대 토크

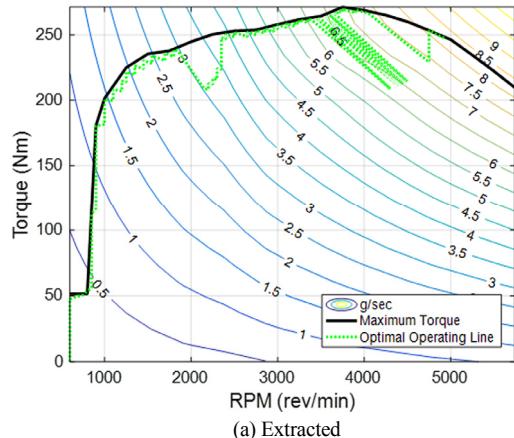
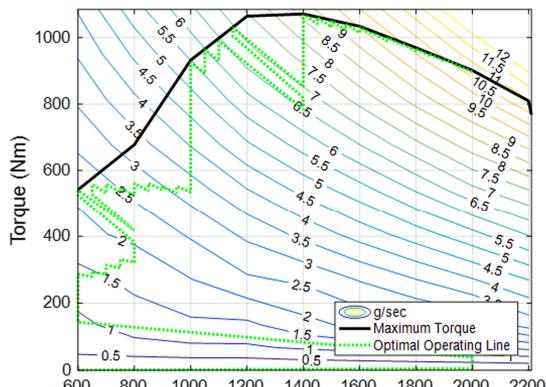


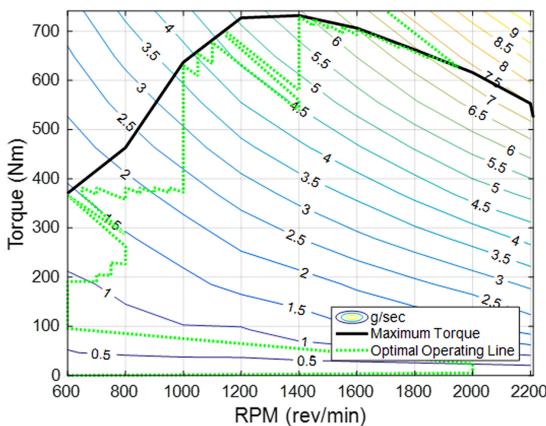
Fig. 2 SI-engine from the autonome engine model library and scaled SI engine 129 kW
 (a) Extracted
 (b) Scaled

와 엔진 속도와 토크에 대한 연료 소모율 데이터로 이루어져 있다. 본 연구에서 적용한 스케일링 기법은 맵의 토크 차원에 대해 최대 토크 값으로 나누어 무차원화하고 여기에 목표 최대 토크를 곱하여 데이터를 재구성하는 방법이다.⁶⁾ 상용 프로그램에서 추출한 데이터의 용량은 모두 다르므로 이를 선행 연구에서 설계한 중형버스 디젤 엔진과 동급으로 비교하기에는 맞지 않다. 이에 대해 앞서 언급한 스케일링 기법을 적용하여 기준 디젤 엔진과 동급으로 동력원 데이터를 재구성하였다.

Fig. 2(a)는 상용프로그램에서 추출한 2200 cc 110 kW급 4기통 가솔린 엔진 맵이다. 최대 파워는 5000 RPM에서 105 kW이고, 최대 토크는 3750 RPM에서 220 Nm이며, 공회전 속도는 764 RPM이다.



(a) Extracted



(b) Scaled

Fig. 3 CNG-engine from the autonomie engine model library and scaled CNG engine 129 kW

Fig. 3(a)는 사용 프로그램에서 추출한 8100 cc 186 kW급 6기통 CNG 엔진 맵이다. 최대 파워는 2000 RPM에서 188 kW이고, 최대 토크는 1400 RPM에서 1071 Nm이며, 공회전 속도는 600 RPM이다.

Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)는 추출한 엔진 맵들로부터 위에서 언급한 스케일링 기법에 적용한 엔진 맵으로 기준 엔진인 디젤 엔진과 같이 최대 출력을 129 kW로 재구성하였다. Fig. 4는 기준 선행 연구에서 설계된 중형버스의 사양에 맞도록 구성된 129 kW급 디젤 엔진 맵이다.³⁾

연료별 중형버스의 구동성능 및 연비 평가를 위해 구성된 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4의 동력원 데이터를 시뮬레이션에 사용하였다.

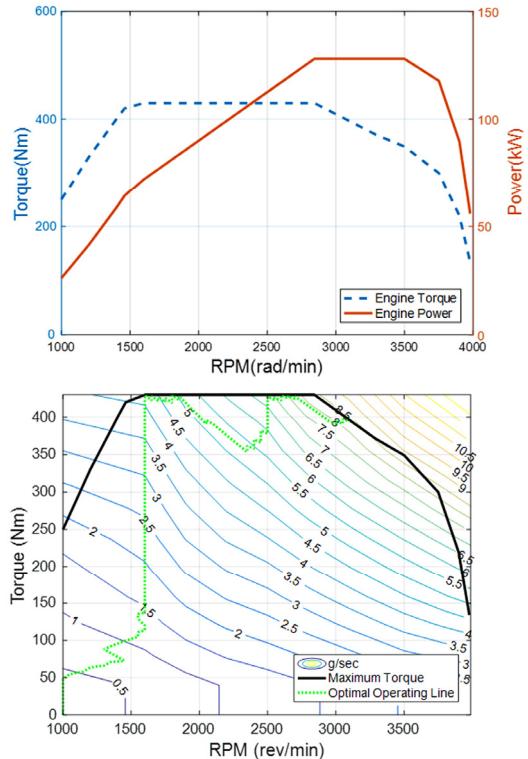


Fig. 4 Conventional diesel-engine 129 kW

2.2 차량 구동성능 분석 및 변속비 설정

각 동력원 변화에 따른 구동성능을 분석하기 위해 개발한 전방향 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용한 디젤 중형버스의 변속기는 6단으로 구성되며, 적용된 기어비는 Table 3과 같다.

연료별 동력원 변화에 따라 엔진의 특성도 변화되기에 때문에 기준 디젤 엔진에 적용되는 동일한 변속 기어비를 적용하면 차량 구동성능 분석에 상당한 오류가 발생된다. 이 때문에 각 동력원의 특성에 적합한 변속 기어비를 설계하여 적용하였다. 동력원 특성에 맞는 기어비는 디젤 중형버스의 구동성을 기준으로 가솔린 엔진 적용 차량과 CNG 엔진 적용 차량도 동일한 가속성능과 최고속도 성능을 낼 수 있는 값으로 설계하였다.

기준이 되는 디젤 중형버스의 구동성능 해석 결과는 가속성능 28.59초, 최대속도 134.9 km/h이며, 등판성능은 22 % 경사를 갖는 도로를 최대 28 km/h 까지 가속 주행할 수 있는 것으로 도출되었다. 해석

결과는 Table 2와 같으며 디젤 차량 성능을 기준으로 가솔린 엔진과 CNG 엔진을 적용하였을 때에 대한 변속기 기어비를 Table 3과 같이 설계하였다. 기어비 설계시 종감속비는 모두 4.563으로 연료별 각 차량에 동일한 값으로 설정하였으며, 설계된 기어비를 적용하여 연료별 구동 성능을 해석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2의 연료별 구동성능 해석 결과를 확인해 보면 소폭의 성능 차이가 있는 것을 확인할 수 있으나 이는 연비 해석 결과에 영향을 주지 않는 오차 내의 값으로써 동일한 성능을 내는 것으로 가정하여 연구를 진행하였다.

시뮬레이션에 적용한 차량 제원 및 환경 변수는 Table 1과 같다. 차량의 무게는 총 적재 중량인 5300 kg으로 설정하여 구동성능 해석을 수행하였으며,

Table 1 Parameters for mid-size bus simulation

Parameters	Units	Values
Radius of tire, r_{tire}	m	0.366
Gross vehicle weight, M_{veh}	kg	5300
Air density, ρ_{air}	kg/m ³	1.204
Rolling resistance coefficient, C_r	-	0.008
Rolling resistance coefficient2, C_{r2}	-	0.00012
Drag coefficient, C_d	-	0.43
Frontal area, A_f	m ²	4.8672
Final drive efficiency, η_{fd}	%	97
Gearbox efficiency, η_{gb}	%	92
Simulation time	sec	0~150
Simulation time step	sec	0.01

Table 2 Comparative driving performance of diesel, gasoline and CNG fueled engines

Fuel type	Acceleration 0~100 km/h (sec)	Max.Speed (km/h)	Hill-climbing ability
Diesel	28.59	134.9	28 km/h@22 %
Gasoline	29.50	134.7	30 km/h@22.5 %
CNG	29.54	135.2	28.5 km/h@18.8 %

Table 3 Transmission gear ratio of diesel, gasoline and CNG fueled engines

	Designed of transmission gear ratio					
Diesel	4.1670	2.3500	1.4620	1.0470	0.7860	0.6250
Gasoline	5.8755	3.3155	2.0614	1.4763	1.1083	0.8812
CNG	2.4169	1.3630	0.8480	0.6073	0.4559	0.3625

차량의 전단면적은 버스의 특징을 반영하고자 전폭과 전고의 곱에 90 % 비율을 적용한 4.8672 m²으로 설정하였다.

선행 연구³⁾에서는 차량의 주행저항 계산에 적용되는 구름 저항 값을 일정한 상수 값으로 적용하지만, 본 연구에서는 관련 문헌⁷⁾을 참고하여 'Cr1+Cr2×V'로 속도에 따라 변하는 값으로 적용하였다. 계산에 필요한 구름저항 계수는 아스팔트에 대한 일반적인 값으로 앞서 소개한 상용 프로그램을 참고하였다.

Fig. 5는 디젤 중형버스의 구동성능 해석 결과에 대한 것으로, 파랑색 점선은 도로경사가 0 %일 때와 최대 일 때의 속도에 따른 주행 저항을 의미한다. 차량 속도에 따른 견인력을 기여 단수별로 분석한 결과를 통해 버스의 주행 가능한 최고속도와 등판성능을 도출하였다. 시뮬레이션 시간에 따른 중형버스의 속도는 해당 시간의 가속도를 계산하고 이를, 수치해석의 오일러 법으로 다음 타임 스텝의 속도를 계산하여 도출한 결과이다. 해당 시뮬레이션을 통해 가속성능은 0~100 km/h 28.59초로 도출되었다.

차량 속도에 따른 엔진 속도 변화를 통해서 엔진 속도 영역 및 기어 단분할비를 확인할 수 있으며, 디젤 중형버스에 적용된 기어 단분할비를 가솔린과 CNG 버스 기어비 설계에 동일하게 적용하였다.

기준 차량에 대해 가솔린 중형버스의 변속단 기어비는 1.41배, CNG 중형저상버스는 0.58배한 값으로 설계되었으며, 해당 기어비에서 연료별 중형버스의 구동성능이 동일하게 매칭되었다. Fig. 6은 가솔린엔진을 적용한 중형버스의 구동성능 결과를 보여주는 것이며, Fig. 7은 CNG 엔진을 적용한 결과이다. 해당 결과는 Table 2에 정리하였으며, 디젤 중형버스의 단분할비를 기준으로 새롭게 설계된 변속비를 적용한 결과이다.

3. 연료별 중형버스 연비 해석 시뮬레이션

후방향 시뮬레이션을 이용하여, 앞 절에서 설계한 연료별 중형저상버스 모델에 대한 연비 평가를 수행하였다.

일반적인 승용차의 연비 평가는 공인 모드로 UDDS와 HWFET가 사용되며, 이를 이용한 5-Cycle

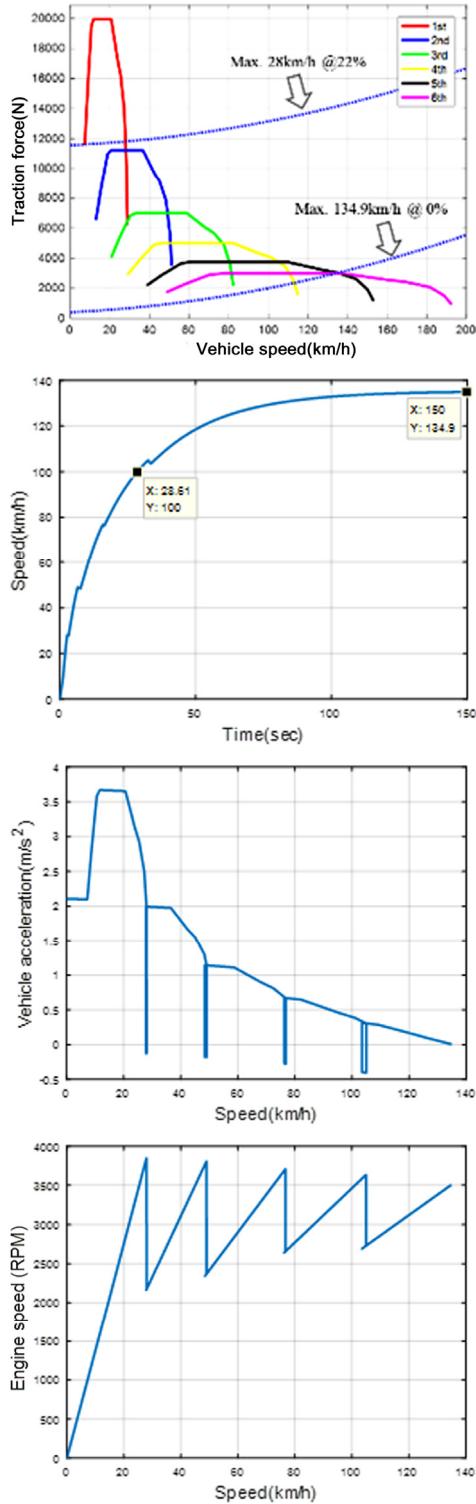


Fig. 5 Driving performance of diesel fueled engine

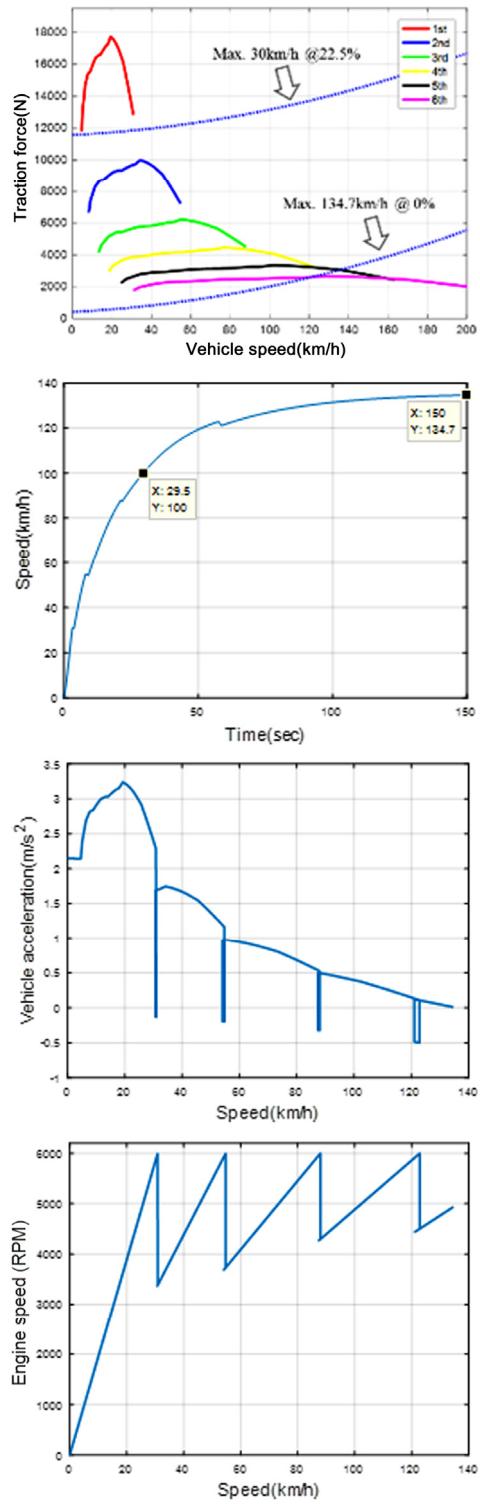


Fig. 6 Driving performance of gasoline fueled engine

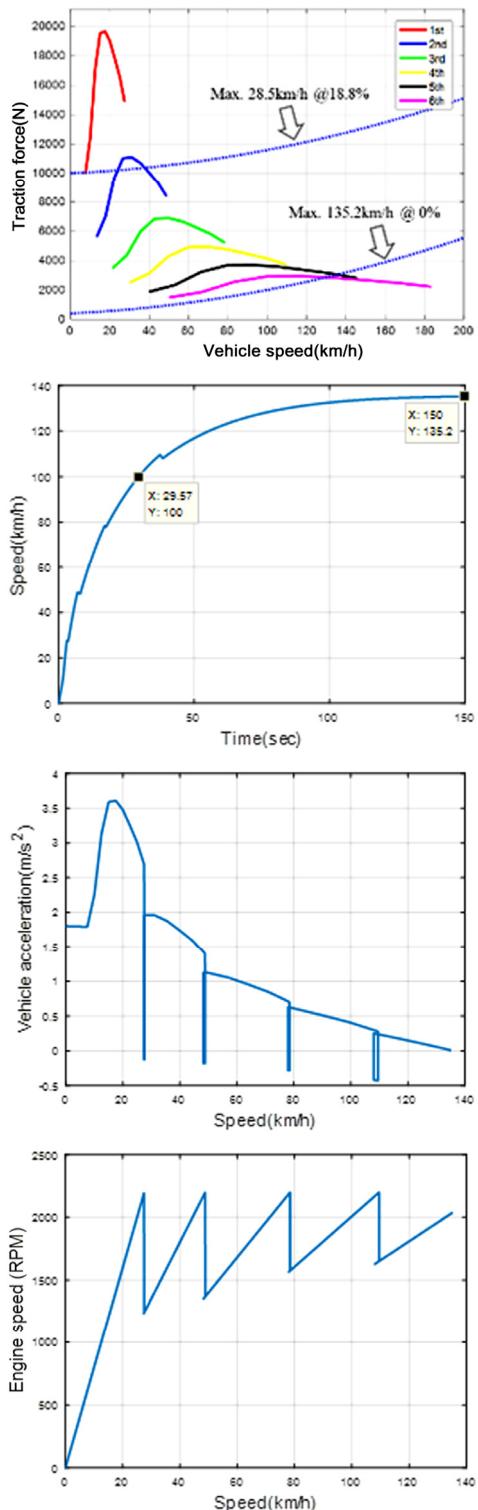


Fig. 7 Driving performance of CNG fueled engine

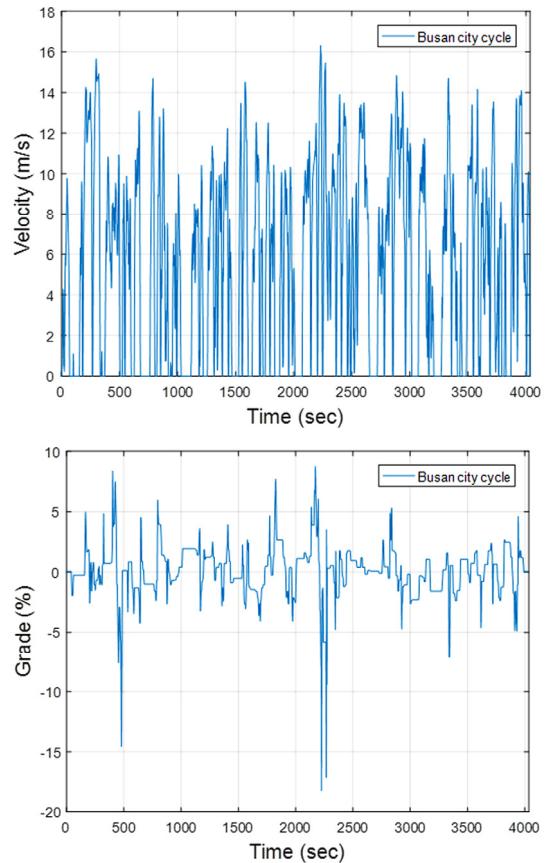


Fig. 8 Driving cycle for fuel economy evaluation

보정식을 적용한 복합 연비로 수행된다. 그러나 국내에는 상용차 연비 평가를 위한 기준이 없는 실정이며, 배출가스 측정은 엔진 분체에서만 이루어지도록 규정 되어있다. 이에 대해 본 연구에서는 연비 평가를 위한 주행 사이클로 실제 버스의 주행 환경이 반영된 Busan city cycle을 선택하였다.

Busan city cycle은 시내버스 노선에 대한 실차 주행을 통해 계측한 데이터로 구성된 사이클로써, Stop & Go 패턴이 빈번하게 발생하는 부산 도심의 시내 버스 주행 특징을 갖는다. 총 23 km의 코스를 약 1시간에 걸쳐 주행하는 사이클로 구성되어 있다.

Fig. 8은 Busan city cycle의 시간에 따른 속도와 경사도를 나타낸 것이며, Table 4는 Busan city cycle의 특징을 JE05 cycle과 비교하여 나타낸 것이다.⁸⁾

차량의 중량 또한 연비 평가에 대한 규정이 없기 때문에 동력성능 해석과 같은 방법으로 차량의 총

Table 4 Features of driving cycle

	Busan city	JE05	Unit
Time	4000	1830	sec
Distance	23	14	km
Avg. speed	25.6	27.3	km/h
Max. speed	60	85	km/h

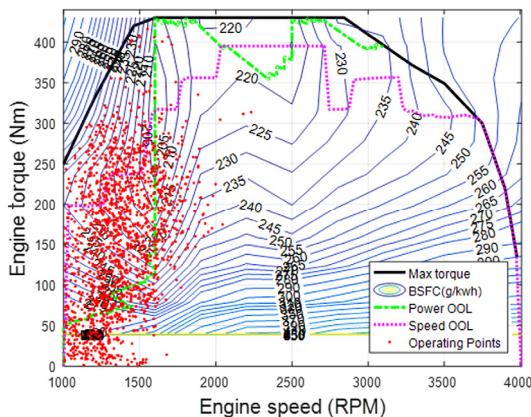


Fig. 9 Diesel engine operating points for Busan city cycle

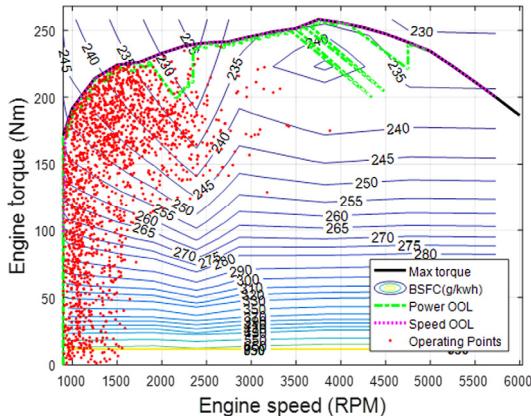


Fig. 10 Gasoline engine operating points for Busan city cycle

중량(GVW)를 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 9, 10, 11은 연료 종류에 따른 엔진 작동점을 나타낸 것이다. 3가지 동력원 모두 엔진 작동점이 최적 작동 선 부근에서 작동되는 경향을 확인할 수 있다. 또한 서로 다른 연료를 사용하는 엔진의 특징에 따라 각각 다른 경향으로 작동점이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 5는 후방향 모델에 적용한 각 연료별 밀도와 시뮬레이션 결과 도출된 에너지소비효율을 디젤

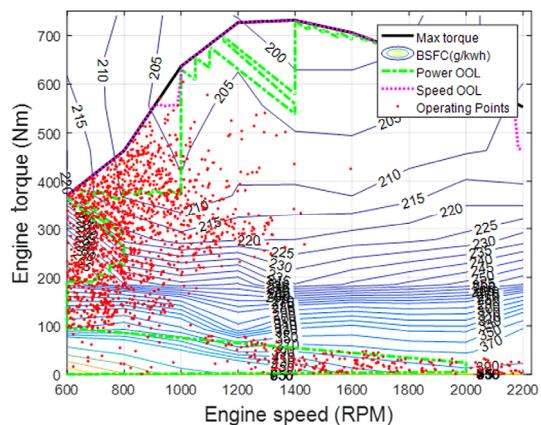


Fig. 11 CNG engine operating points for Busan city cycle

Table 5 Fuel density and heating values for backward simulation

Fuel type	Fuel density (kg/l)	Calorific value (kcal/l)	Fuel heating value (J/g)
Diesel	0.835	8420.0	42210
Gasoline	0.742	7597.4	42861
CNG	0.217	2436.5	47000

Table 6 Simulation results of fuel economy on Busan city cycle

Fuel type	Fuel economy (km/l)	Diesel equivalent fuel economy (km/l)
Diesel	7.20	-
Gasoline	6.05	6.7051
CNG	1.98	6.8424

Table 7 Simulation results of fuel economy on Busan city cycle with grade resistance

Fuel type	Fuel economy (km/l)	Diesel equivalent fuel economy (km/l)
Diesel	6.77	-
Gasoline	5.69	6.3061
CNG	1.86	6.4277

기준으로 환산하여 등가 연비를 제시하기 위해 적용한 환산 계수를 나타낸 것이다. Fuel heating value는 도출된 결과 분석을 통해 각 연료별 엔진 열효율을 비교하기 위해 사용되었다.

Table 6과 Table 7은 후방향 모델로부터 도출된 연비 해석 결과로써, Table 7은 Busan city cycle에 경사율이 포함된 해석 결과이다. Busan city cycle에 대해 경사율에 의한 연비 차이는 디젤 0.43 km/l, 가솔린

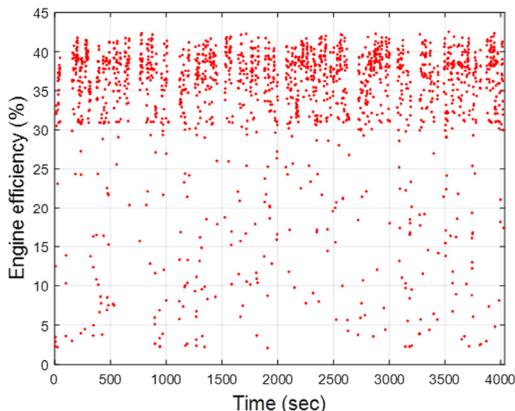


Fig. 12 Diesel engine efficiency points for Busan city cycle

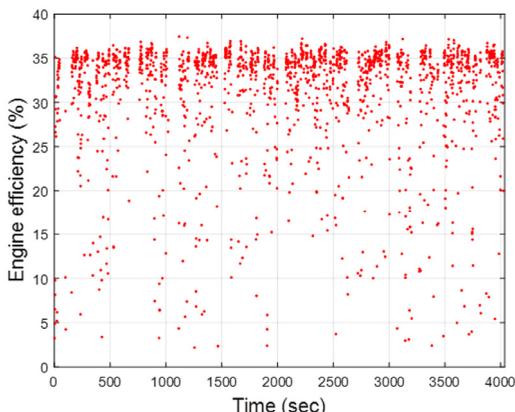


Fig. 13 Gasoline engine efficiency points for Busan city cycle

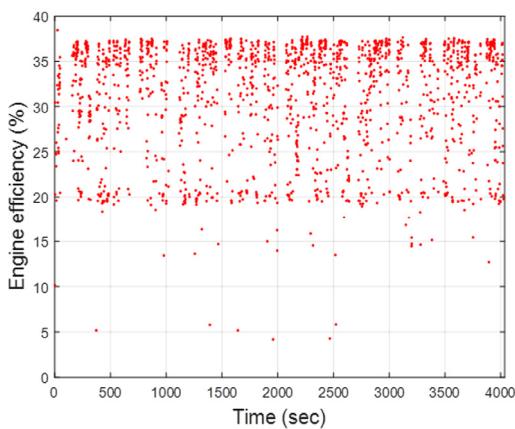


Fig. 14 CNG engine efficiency points for Busan city cycle

0.36 km/l, CNG 0.12 km/l로 나타난 것을 확인할 수 있었다.

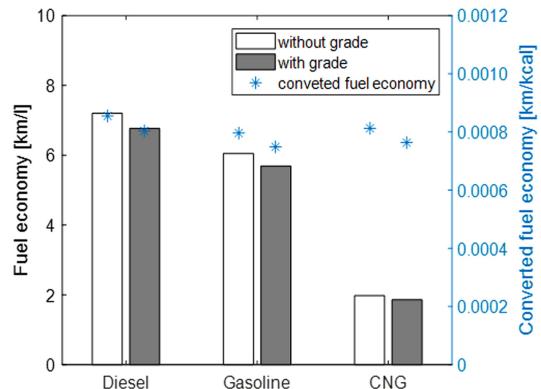


Fig. 15 Evaluation of fuel economy by fuel type

Table 8 Thermal efficiency of engines

Fuel type	Thermal efficiency of engine on Busan city cycle (%)
Diesel	37.20
Gasoline	33.94
CNG	33.72

Busan city cycle에 대해 디젤 기준으로 등가 연비로 환산한 결과 디젤 장착 차량이 7.20 km/l로 가장 높은 에너지소비효율로 분석되었으며, CNG 차량은 6.8424 km/l, 가솔린 차량은 6.7051 km/l으로 해석되었다.

Fig. 12, 13, 14는 후방향 시뮬레이션을 통해 도출한 연비 해석 결과를 엔진의 열효율로 분석한 것이다. 이를 통해 디젤의 평균 열효율은 37.20 %, 가솔린 33.94 %, CNG 33.72 %로 분석되었으며, Table 8에 평균 효율을 정리하였다.

결과 바탕으로 디젤의 열 효율이 가장 좋은 것으로 확인할 수 있다. 그러나, 다소 미미한 차이지만 가솔린 엔진의 경우에는 CNG 엔진에 비해 평균 열효율이 높으나 연비 해석 결과는 CNG 엔진보다 낮은 것으로 도출되었다.

위와 같은 원인은 CNG 엔진이 적용된 차량의 경우에 Fig. 14를 보면 엔진 작동점이 약 20 % ~ 35 % 사이에서 대부분 나타난 것을 확인할 수 있으나, 가솔린 엔진의 경우에는 엔진 작동점 효율이 20 % 이하에서도 상대적으로 많이 나타났기 때문으로 분석되었다.

시뮬레이션 해석 결과는 Fig. 15와 같이 나타난 것으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료에 따른 중형버스의 구동성능 및 연비 해석을 수행하였다. 기준 차량은 디젤 중형 버스로 설정하였으며, 이에 대해 구동성능을 도출하였다. 도출된 디젤 중형버스의 가속성능, 최고속도 성능, 등판 성능을 참고하여 이와 동급의 성능을 낼 수 있도록 가솔린 엔진 차량과 CNG 엔진 차량의 기어비를 설계하였다. 동일한 차량 제원을 바탕으로 동급의 구동성능을 갖는 디젤, 가솔린, CNG 중형 버스에 대해 선행 연구를 통해 개발된 후방향 시뮬레이션을 이용하여 연비 해석을 수행하였다. 연비 해석에 적용한 주행 사이클은 Busan city cycle을 이용하였으며, 경사율이 포함된 경우에 경사율을 갖지 않는 2가지에 대해 해석을 수행하였다.

후방향 시뮬레이션을 이용한 연비 해석 결과 Busan city cycle에서 디젤 중형버스 연비는 7.20 km/l, 가솔린 6.05 km/l, CNG 1.98 km/l로 도출되었으며, 이를 디젤 기준으로 환산하여 비교한 등가 연비는 가솔린 6.7051 km/l, CNG 6.8424 km/l로 산출되었다. 해석 결과로부터 디젤, CNG, 가솔린 차량 순으로 에너지소비효율이 높은 것으로 분석되었다.

향후 다양한 주행 사이클에 대한 연비 해석 및 대형차대동력계를 이용한 실차 연비 평가 시험 수행 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술 연구비(일부)지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) R. A. Barnitt, "In-use Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses at New York City Transit," SAE 2008-01-1556, 2008.
- 2) Y. Kim, K. Choi and D. Jeong, "Comparison of Fuel Consumption and Exhaust Gas Emission between Euro 5 Diesel Bus and CNG Bus," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.448-451, 2012.
- 3) G. Kim, J. Kim, Y. Park and C. Lee, "Driving Performance Prediction for Low-floor Midsize Bus Using Simulator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.24, No.5, pp.541-547, 2015.
- 4) J. Jeong, D. Lee, C. Shin, D. Jeong, K. Min, S. Cha and Y. Park, "Comparison of the Fuel Economy of Series and Parallel Hybrid Bus System Using Dynamic Programming," Transactions of KSAE, Vol.21, No.1, pp.92-98, 2013.
- 5) J. Kim, C. Lee and Y. Park, "Analysis of Fuel Economy for Series Plug-in Hybrid Electric Bus according to Engine Operation Strategy Based on Simulation," Transactions of KSAE, Vol.22, No.5, pp.102-107, 2014.
- 6) M. D. Petersheim and S. N. Brennan, "Scaling of Hybrid-electric Vehicle Powertrain Components for Hardware-in-the-loop Simulation," Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Control Applications, pp.720-726, 2008.
- 7) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, Warrendale, 1992.
- 8) Y. Kim, Y. Lee, K. Choi and D. Jeong, "Development of a Parallel-Type Diesel Hybrid Bus and Fuel Efficiency Results from Trial Runs," SAE 2011-28-0065, 2011.