



제어용 실시간 평균값 디젤 엔진 모델

이 성 화¹⁾ · 정 재 우²⁾ · 이 형 철^{*3)}

한양대학교 전기공학과 · 자동차부품연구원 그린파워시스템 연구본부 · 한양대학교 전기제어생체공학부

Control Oriented Model for Real-time Mean-value Diesel Engine

Sunghwa Lee¹⁾ · Jaewoo Chung²⁾ · Hyeongcheol Lee^{*3)}

¹⁾Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

²⁾Green Car Power System R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

³⁾Department of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 29 September 2017 / Revised 13 December 2017 / Accepted 18 December 2017)

Abstract : Diesel engines are highly efficient and highly durable. It is an attractive power source for most vehicle applications. A hybrid drive train with a diesel engine has the potential of achieving an improved fuel consumption and reduced exhaust gas. In this paper, a diesel engine model for developing an energy control unit for hybrid vehicles is presented. Most engine models for hybrid vehicles are quasi-stationary; therefore, they could not represent the effects of the indicated efficiency by air-to-fuel ratio and exhaust gas recirculation(EGR). In order to consider those effects on fuel efficiency and NOx emission, the mean-value diesel engine model, including air-path characteristics, is developed and validated with the experiment data. This model has inlet and exhaust manifolds, the pumping action of the engine, the turbocharger, the intercooler, and the EGR circuit.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), Mean-value(평균값), Real-time(실시간)

1. 서 론

자동차 관련 산업에서 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 높은 출력, 연비와 내구성의 장점 때문에 적용 사례가 늘고 있다. 그러나 점점 강해지는 배기가스 규제를 만족시키기 위해 더 복잡한 엔진 제어 시스템을 필요로 한다.¹⁾ 배기가스 재순환(EGR)과 가변형 터보차저(VGT)를 제어하는 것이 그 방법들 중 하나이다.^{2,3)} 그리고 최근에는 하이브리드 차량에서 전기에너지와 함께 엔진을 이용함으로써 연비를 향상시키고 배출가스를 감소시키는 연구도

활발히 진행되고 있다. 하이브리드 차량의 경우 일반적으로 엔진의 정상상태 연료 소모량과 NOx 배출량 맵을 통한 동력분배 최적화에 관한 연구가 대부분이며, 디젤엔진의 공기순환계 모델을 이용하여 EGR과 VGT 제어와 하이브리드 차량의 동력분배 제어를 동시에 수행하는 연구는 아직 부족하다.⁴⁾ 디젤 엔진 공기순환계 모델의 경우 계산이 복잡하고 시뮬레이션 시간이 오래 걸려 실시간 제어를 수행하기 어렵기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 제어를 위한 시뮬레이터 기반 실시간 평균값 디젤 엔진 모델을 제안하였다. 모델의 대상 엔진은 하

*Corresponding author, E-mail: hclee@hanyang.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.

이브리드 차량에서 이용되는 고정식 터보차저(WGT)와 EGR을 포함한 소형 차량용 디젤 엔진이다. 최근에는 VGT가 많이 이용되고 있으나 소형 엔진에서는 가격적인 측면이 중요하여 WGT를 이용한다.⁶⁾ 제한한 엔진 모델은 엔진의 동적 특성을 나타내는 수식 기반으로 구성하였다.⁵⁾ 제어 알고리즘 구현에 필요한 계산 속도 확보를 위해 모델의 일부는 시험데이터 기반 맵으로 대체하였다. 모델의 타당성을 보이기 위해서 먼저 정상상태 기반 엔진 시험 데이터를 이용하여 단품 모델을 구성하고 비교 검증을 수행 하였다. 그리고 엔진 통합 모델에 엔진 다이내모 미터에서 얻은 과도상태 데이터로부터 보정한 엔진 맵을 적용하여 모델의 정확성을 높였다.

2. 기준 엔진

본 연구를 위해 1.4 L급 커먼레일 디젤 엔진을 선정하였고, 주요 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of a test engine

Displacement Vol. (L)	1.4
Bore×Stroke (mm)	75 × 79
Cylinder No.	4
Compression ratio	17
EGR system	HP(high pressure) loop type with EGR cooler
Turbo system	WGT

선정한 엔진의 다이내모미터 시험을 통해 시험데이터를 획득 하였다. 시험 데이터는 크게 두 종류로 나누어진다. 첫 번째는 100여개의 서로 다른 엔진 속도와 토크에 대해 얻은 정상상태 데이터이다. 그리고 두 번째는 FTP 사이클에 대한 엔진 동적 시험 데이터이다. 정상상태 시험 데이터로부터 디젤 엔진의 주요 맵을 얻었고, 이를 적용하여 디젤 엔진 평균값 모델을 구성하였다. 3장에서 단품 별로 검증을 수행하였고, 4장에서는 엔진 통합 모델을 구성하고, FTP 사이클 시험데이터로부터 맵을 보정하여 엔진 과도상태에 특성을 고려하였다. 그리고 시뮬레이션 결과와 시험데이터 비교를 통하여 평균값 디젤 엔진 모델의 타당성을 확인하였다.

3. 엔진 구조

수학적 수식을 기반으로 디젤 엔진 평균값 모델을 구성하였고, 구조는 Fig. 1과 같다. 정상상태 시험 데이터를 이용하여 구성한 모델의 주요 맵을 얻었고, 결과 비교를 통하여 타당성을 검증하였다.

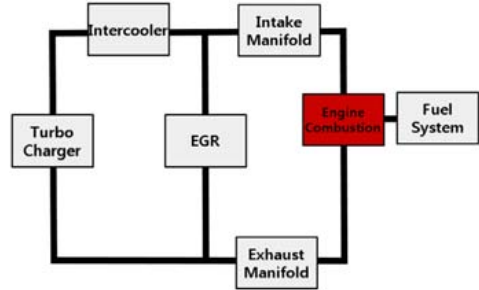


Fig. 1 Diesel engine configuration

3.1 엔진 토크 및 연료 시스템 모델

엔진의 연료 분사량은 요구 토크에 따라 결정된다. 따라서 정상상태 엔진 시험데이터로부터 Fig. 2와 같이 요구 토크에 대한 연료 분사량 곡선을 생성 하였다. 식 (1)을 이용하여 연료 분사량, 연료 밀도와 엔진 회전 속도를 이용하여 연료 유량율을 계산 하였다.

$$m_{fuel} = \frac{60}{2} \cdot \rho_{fuel} \cdot q_{inj} \cdot \omega_{eng} \quad (1)$$

$$q_{inj} = f(T_{req}) \quad (2)$$

where

\dot{m}_{fuel} : fuel mass flow rate (kg/h)

ρ_{fuel} : fuel density (kg/m³)

q_{inj} : injection quantity (m³/str)

T_{req} : required torque (Nm)

ω_{eng} : engine speed (rev/min)

엔진의 공기 유량율은 식 (3)으로부터 얻을 수 있다. 체적효율은 엔진 정상상태 동작의 경우 엔진 속도에 의해 영향을 받는 인자이며, 시험데이터에 의해 Fig. 3과 같이 체적 효율 곡선을 나타내었다. 엔진의 과도상태 동작의 경우에는 엔진의 속도와 흡기 압력에 따라 체적 효율이 계산된다. 온도는 흡기 매니폴드 모델로부터 계산하였다.

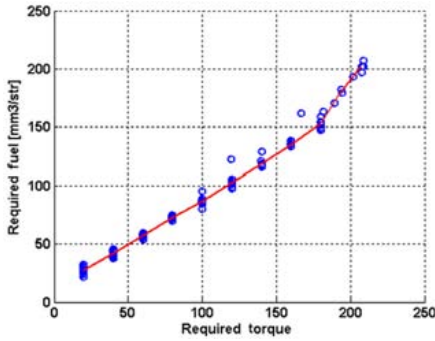


Fig. 2 Required fuel injection to torque curve

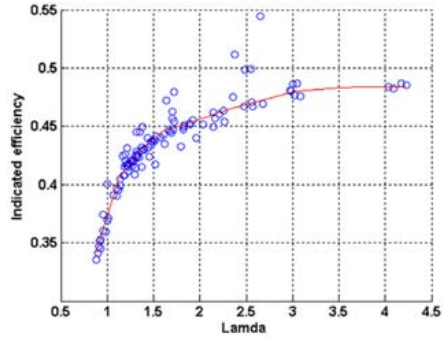


Fig. 4 Indicated efficiency

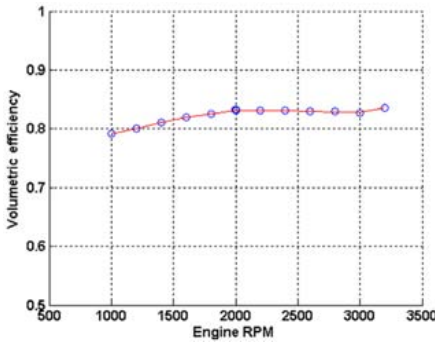


Fig. 3 Volumetric efficiency

$$\dot{m}_{air} = 30 \cdot \omega_{eng} \cdot \eta_{voleff}(\omega_{eng}, P_{inman}) \cdot \frac{P_{inman} \cdot V_{eng}}{R \cdot T_{inman}} \quad (3)$$

where

\dot{m}_{air} : air mass flow rate (kg/h)

η_{voleff} : volumetric efficiency (-)

P_{inman} : intake manifold pressure (bar)

T_{inman} : intake manifold pressure (K)

V_{eng} : engine volume (m^3)

공기량과 연료량으로부터 공연비를 계산할 수 있다. 지시 효율은 공연비에 따라 변하므로 정상상태 시험데이터로부터 얻은 지시효율 곡선을 Fig. 4에 나타내었다.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (4)$$

$$\eta_{ind}(\lambda) = \eta_{ind}\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right) \quad (5)$$

where

η_{ind} : indicated efficiency (-)

λ : air-fuel ratio (-)

지시 효율로부터 평균유효압력(IMEP)을 계산 가능하며 식 (7)에 나타내었다. 지시효율은 공연비에 대한 함수로 계산하였고, FMEP와 PMEP는 식 (8), (11)을 통해 계산하였다. 수식의 파라미터는 시험데이터를 기반으로 구하였다. 시험데이터를 기반으로 p_{max} 는 흡기 압력에 대한 함수로 가정하였다. 엔진이 출력하는 유효 토크는 식 (8)~(12)를 이용하여 식 (13)으로부터 계산할 수 있다.

$$m_{fuel} = \dot{m}_{fuel} / (\omega_{eng} \cdot 60/2) \quad (6)$$

$$IMEP = \eta_{ind}(\lambda) \cdot (h_{LHV} \cdot m_{fuel}) / V_{eng} \quad (7)$$

$$FMEP = a_1 + a_2 \cdot p_{max} + a_3 \cdot p_{max}^2 + a_4 \cdot \varphi + a_5 \cdot \varphi^2 \quad (8)$$

$$\varphi = 2 \cdot stroke \cdot \omega / 60 \quad (9)$$

$$Dp = (P_{exman} - P_{inman}) \quad (10)$$

$$PMEP = a_6 \cdot Dp^2 + a_7 \cdot Dp + a_8 \quad (11)$$

$$BMEP = IMEP - (FMEP + PMEP) \quad (12)$$

$$T_{engbrk} = \frac{1}{4\pi} \cdot BMEP \cdot V_{eng} \quad (13)$$

where

IMEP : indicated mean effective pressure (bar)

h_{LHV} : lower heating value (J/g)

FMEP : friction mean effective pressure (bar)

a_i : experimental constants

- φ : mean piston speed (m/s)
- p_{max} : maximum cylinder pressure (bar)
- stroke : engine stroke (m)
- PMEP : pumping mean effective pressure (bar)
- Dp : differential pressure
- P_{exman} : pressure in the exhaust manifold
- P_{inman} : pressure in the intake manifold
- T_{engbrk} : engine brake torque (Nm)

Fig. 5~7에 연료 유량율, 공기 유량율, 유효 토크의 모델 값과 정상상태 시험데이터 비교 결과를 나타내었다. Table 2에 비교 오차를 나타내었다.

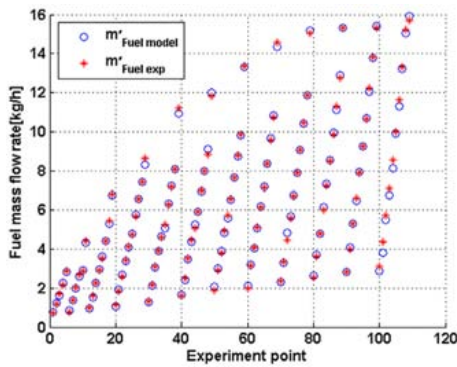


Fig. 5 Fuel mass flow rate result

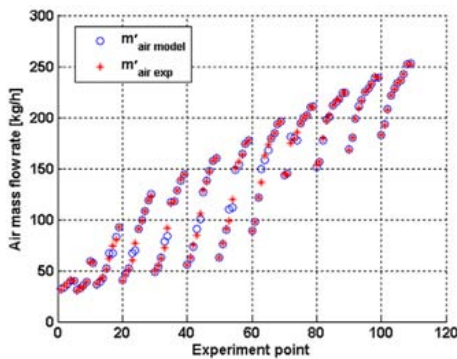


Fig. 6 Air mass flow rate result

3.2 터보차저 모델

터보차저는 터빈으로 유입되는 배기유량으로부터 터보 축을 회전시켜 압축기를 통해 유입되는 공기의 압력을 높여준다. 본 논문에서는 맵 기반으로 터보 축 회전 속도와 압축비를 계산함으로써 모델

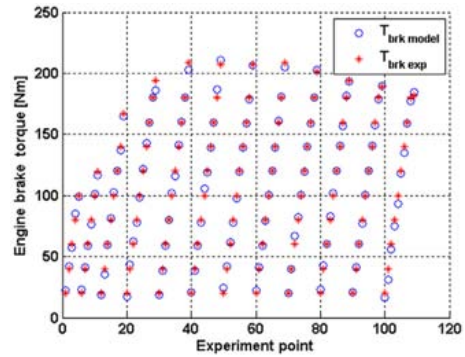


Fig. 7 Engine brake torque result

Table 2 Mean error rate results

	Mean error rate (%)
Fuel mass flow rate	2.116
Air mass flow rate	1.615
Engine brake torque	3.350

은 간소화 하였다. 정상상태 데이터를 이용해 맵을 생성하고 검증하여 모델의 타당성을 확인하였다 (Fig. 8,9).

$$\omega_{TC} = f(\omega_{eng}, q_{inj}) \quad (14)$$

$$\Pi_{Comp} = f(\dot{m}_{comp}, \omega_{TC}) \quad (15)$$

$$P_{compout} = \Pi_{comp} \cdot P_{compin} \quad (16)$$

where

Π_{Comp} : compressor pressure ratio (-)

\dot{m}_{comp} : compressor mass flow rate (kg/h)

ω_{TC} : turbocharger shaft speed (rev/min)

$P_{compout}$: compressor output pressure (bar)

P_{compin} : ambient pressure (bar)

3.3 흡기 매니폴드 모델

흡기 매니폴드는 터보차저 압축기 유량과 EGR 유량을 엔진 실린더로 전달하며 질량 보존의 법칙에 의해 식 (17)이 성립한다. 흡기 매니폴드 유량은 이상기체 식 (18)에 의해 계산한다. 엔진 유량은 앞서 계산하였다. 시험데이터를 분석한 결과 흡기 매니폴드 압력은 압축기 압력과 비례하는 것을 확인하였다(Fig. 10). 따라서 압축기 압력으로부터 흡기 매니폴드 압력을 계산하였다. 흡기 매니폴드 온도의

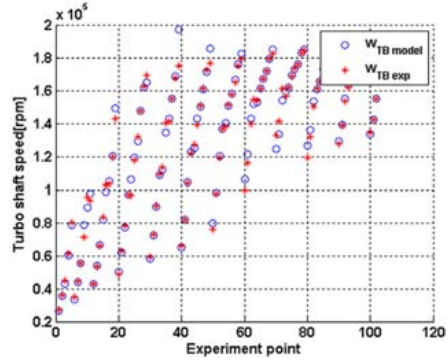
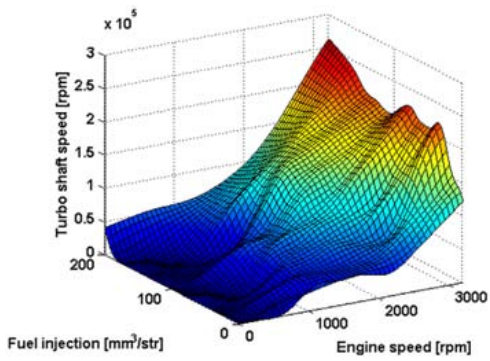


Fig. 8 Turbo shaft map and result

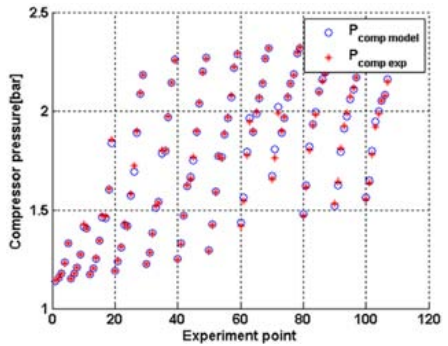
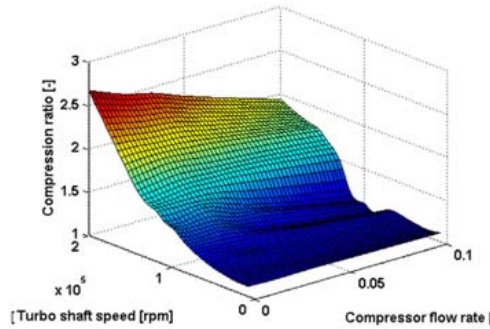


Fig. 9 Compressor pressure map and result

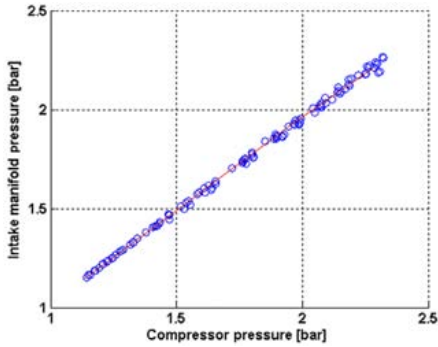


Fig. 10 Intake manifold pressure curve result

경우 온도의 변화가 크지 않으므로 열역학적 거동은 무시하고 엔진 동작 점에 대한 맵핑 값으로 계산하였다.

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{inman} + \dot{m}_{eng\ in} - \dot{m}_{egr\ out} \quad (17)$$

$$m_{inman} = \frac{P_{inman} V_{inman}}{R \cdot T_{inman}} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{eng\ in} = \dot{m}_{air} \quad (19)$$

$$P_{inman} = f(P_{compout}) \quad (20)$$

식 (17)로부터 컴프레서 유량을 계산하고, 이 값을 식 (15)을 적용하여 컴프레서 압축비를 계산한다. 식 (17)은 미분 방정식이 포함되어 있으므로 4장에서 엔진 통합 모델을 구성하여 주행 사이클을 적용한 엔진의 과도 상태에서 대한 시뮬레이션 결과를 이용하여 모델의 타당성을 확인하였다.

3.4 EGR 및 배기 모델

EGR 장치는 EGR 라인을 통해 배기가스 중 일부를 흡기관으로 재순환시킨다. EGR 모델에서는 엔진 동작상태에 따라 EGR 밸브를 제어하여 재순환되는 배기량을 계산한다. 정상상태 상태 시험데이터를 이용해 엔진 속도와 요구 연료량에 대한 밸브 개구면적 맵을(Fig. 11) 생성하였다.

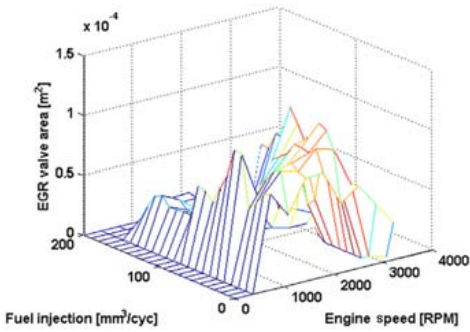


Fig. 11 EGR valve area control map

$$A_{EGR} = f(\omega_{eng}, q_{inj}) \quad (21)$$

재순환 되는 공기량은 식 (22)와 같이 면적, EGR 입,출력 압력, 온도로부터 계산할 수 있다.

$$\dot{m}_{egr\ out} = A_{egr} \cdot P_{egr\ in} \cdot \sqrt{\frac{2}{RT_{egr}}} \cdot \Psi \left(\frac{P_{egr\ out}}{P_{egr\ in}} \right) \quad (22)$$

where

\dot{m}_{EGR} : EGR mass flow rate (kg/h)

A_{EGR} : EGR valve oper area (m²)

T_{EGR} : EGR temperature (K)

Ψ : flow function (-)

P_{EGR} : EGR pressure (bar)

배기 온도와 압력 모델의 경우 정상상태 데이터와 과도상태 데이터를 종합하여 엔진의 속도와 연료소모량 값에 대한 맵으로 구성하였다.

$$P_{exhman} = f(\omega_{eng}, q_{inj}), \quad T_{exhman} = f(\omega_{eng}, q_{inj}) \quad (23)$$

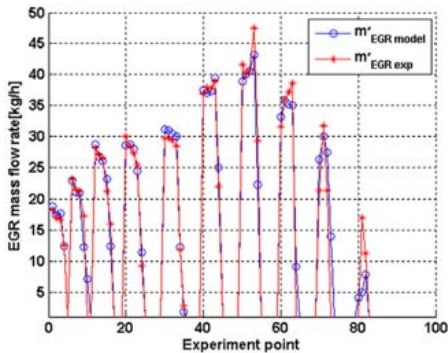


Fig. 12 EGR mass flow rate result

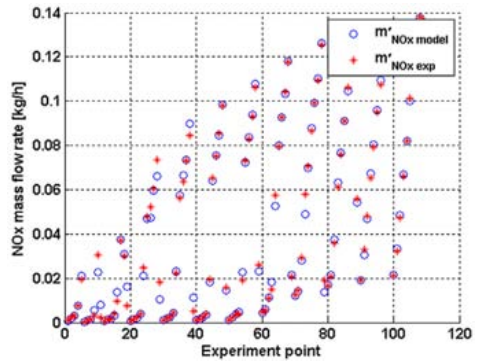


Fig. 13 NOx mass flow rate result

배기 매니폴드를 통해 배출되는 NOx는 식 (24)와 같이 엔진에서 배출되는 유량에서 EGR로 재순환되는 공기량을 뺀 값에 엔진 동작점에 따라 배출되는 NOx 농도를 곱하여 계산하였다.

$$\dot{m}_{NOx} = (\dot{m}_{engout} - \dot{m}_{egr}) \cdot \Psi_{NOx}(\omega_{eng}, q_{inj}) \quad (24)$$

where

\dot{m}_{NOx} : NOx mass flow rate (kg/h)

Ψ_{NOx} : NOx concentration (ppm)

Fig. 13에서 NOx 배출량 시험 값과 모델 값을 비교하였다.

4. 엔진 모델 통합

앞장의 흡기 매니폴드, WGT, EGR, 실린더, 배기 시스템을 통합하여 디젤엔진 공기 순환계 모델을 구성하였다. 통합 모델의 과도상태 특성을 고려하기 위하여 NEDC 및 FTP 사이클 엔진 다이내모미터 시험 데이터를 종합하여 오차가 최소가 되도록 맵을 피팅(Fitting)하여 각각의 엔진 맵을 보정하였다. 모델의 구조는 Fig. 14와 같고, 입력 신호는 엔진 요구 속도와 요구 토크이며 출력신호는 엔진 토크와 연료 소모량, NOx 배출량 등이다.

4.1 통합 모델 시뮬레이션

Matlab Simulink를 이용하여 평균값 디젤 엔진 모델을 구현하였다. 구현한 모델에 NEDC와 FTP 사이클 시험데이터를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 엔진 다이내모미터 시험 데

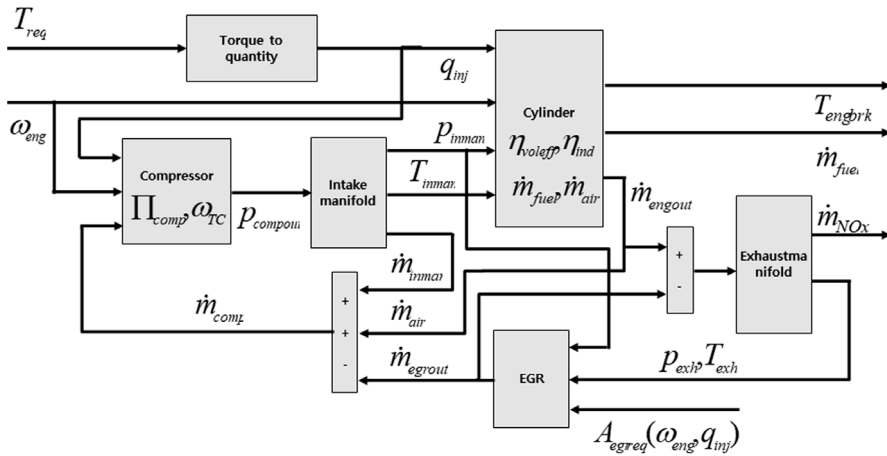


Fig. 14 Diesel engine air-path model configuration

이더 비교를 통해 통합 모델의 정확도를 평가하였다. 요구 토크와 속도 입력에 대해서 출력되는 엔진 주요 신호 결과 비교를 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 16은 NEDC와 FTP 전체 사이클을 합친 것이고 Fig. 17은 FTP 사이클의 365초에서 465초 사이의 시뮬레이션 결과 비교이다. 시뮬레이션 결과 값과 시험 값 비교로부터 평균값 기반 실시간 디젤 엔진 모델이 정상상태 특성뿐 아니라 과도상태 특성도 포함하는 것을 확인하였다. 만약 제한한 모델을 다른 종류의 엔진에 적용하기 위해서는 엔진 시험데이터로부터 필요한 맵을 생성하여 대체함으로써 구성 가능하다.

5. HILS 환경 구축

디젤 엔진 1D model의 경우 모델이 복잡하여 차량 모델에 연결하여 실시간 시뮬레이션을 수행하기에는 부적합하다. 제안한 평균값 디젤 엔진 모델의 경우 1D model에 비해 정확도는 비슷하거나 약간 떨어지는 반면에 시뮬레이션 속도가 훨씬 빠르기 때문에 실제 차량 모델에 적용하여 디젤 엔진의 정상상태 뿐 아니라 과도상태 특성을 포함한 시뮬레이션이 가능하다. 제안한 엔진 모델의 실시간 동작성을 확인하기 위해 HILS(Hardware in the loop simulation) 환경을 구축하였다. Dspace사의 RTI(Real time interface) 장비에 평균값 엔진을 포함한 차량 모델을 탑재하고, RCP(Rapid control prototype) 장비인

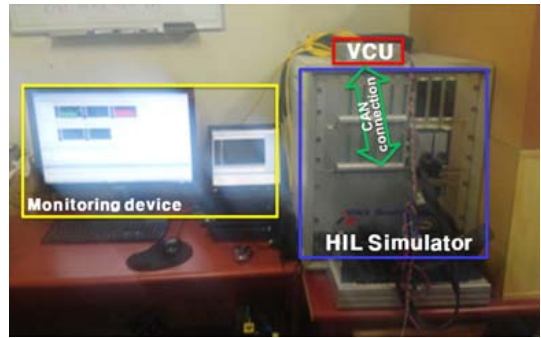


Photo. 1 HILS environment

Micro autobox 제어보드에 VCU(Vehicle control unit) 알고리즘을 탑재하였다. 그리고 차량과 VCU 사이의 입출력은 CAN 통신을 이용해 신호를 주고받을 수 있도록 인터페이스를 구축하였다. CAN 통신 주기는 10 ms로 설정하였다. Photo. 1에 구축한 HILS 환경을 나타내었다.

실시간 시뮬레이터에 탑재한 차량 모델은 Fig. 15와 같이 디젤 엔진 병렬형 하이브리드 차량으로 구성하였다.

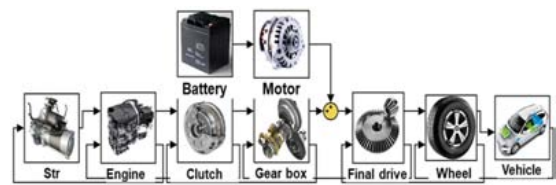


Fig. 15 Vehicle configuration

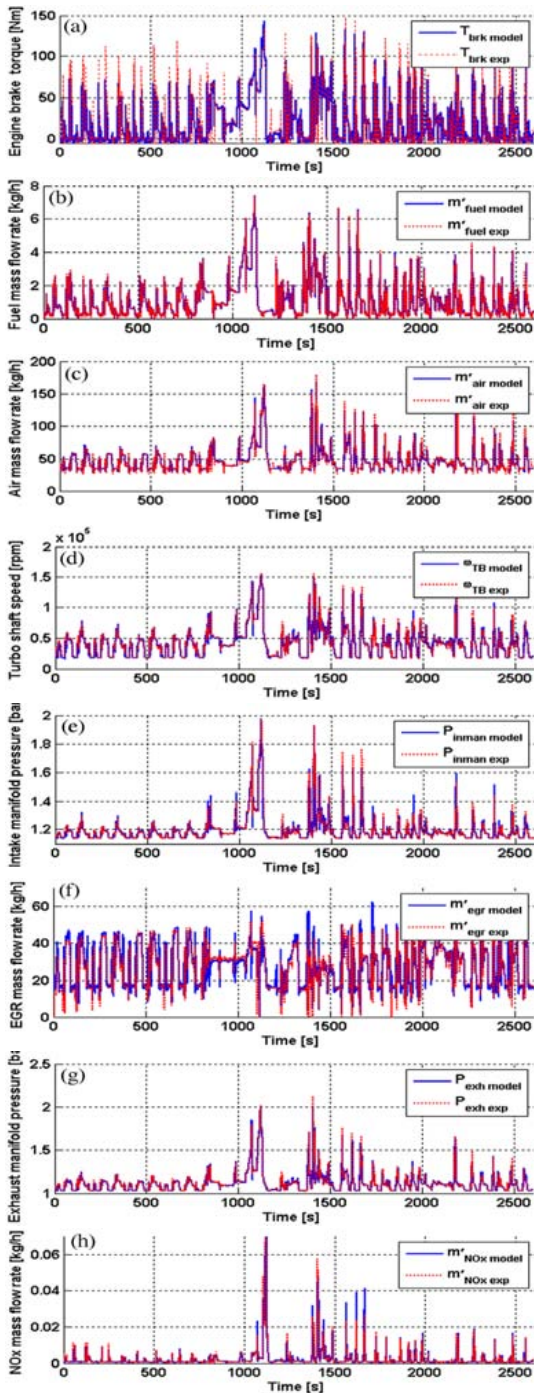


Fig. 16 Comparisons of simulation results of the integrated model and the dynamometer NEDC+FTP cycle experiments data: (a) engine brake torque, (b) fuel mass flow rate, (c) air mass flow rate, (d) turbo shaft speed, (e) intake manifold pressure, (f) EGR mass flow rate, (g) exhaust manifold pressure, (h) NOx mass flow rate

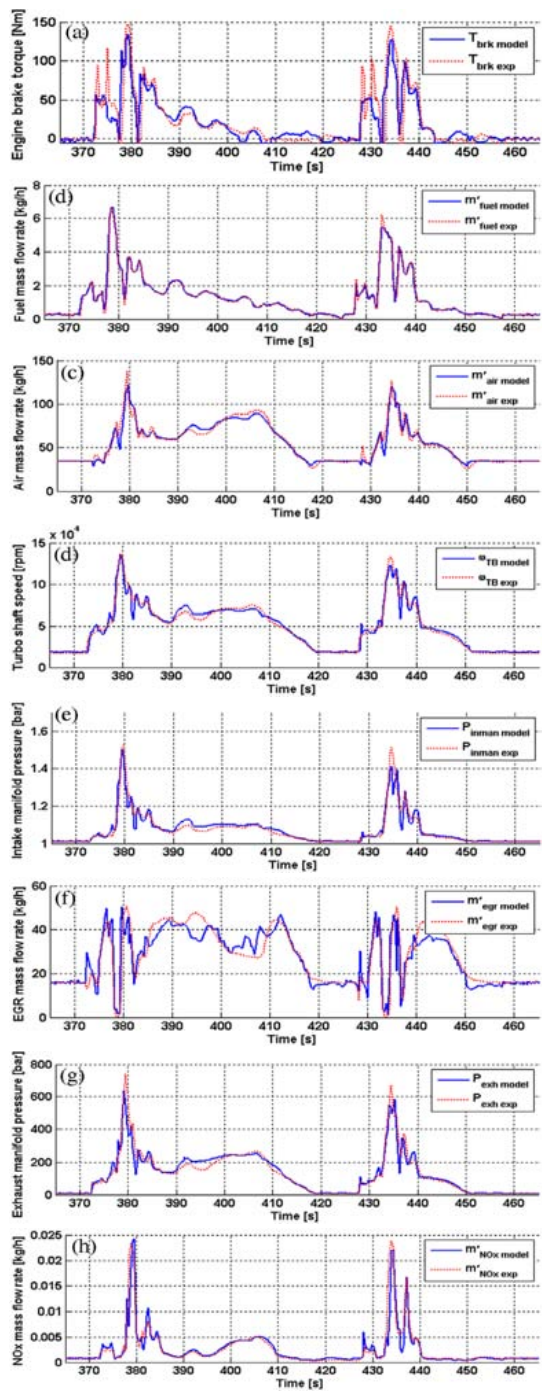


Fig. 17 Comparisons of simulation results of the integrated model and the dynamometer FTP cycle (365-465 seconds) experiments data: (a) engine brake torque, (b) fuel mass flow rate, (c) air mass flow rate, (d) turbo shaft speed, (e) intake manifold pressure, (f) EGR mass flow rate, (g) exhaust manifold pressure, (h) NOx mass flow rate

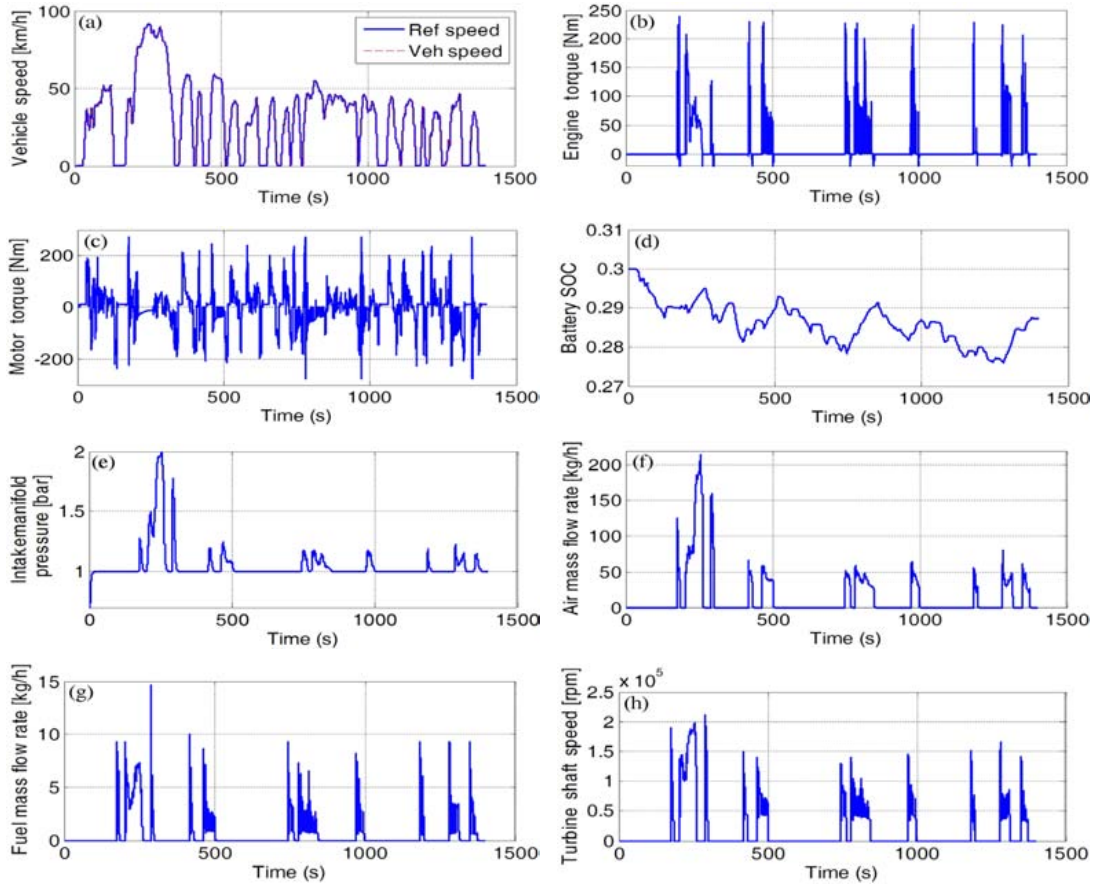


Fig. 18 HILS simulation results of the parallel hybrid model (FTP cycle): (a) vehicle speed, (b) engine torque, (c) motor torque, (d) battery SOC, (e) intake manifold pressure, (f) air mass flow rate, (g) fuel mass flow rate, (h) turbo shaft speed

위의 HILS 환경에서 실시간 시뮬레이션을 수행하여 평균값 엔진 하이브리드 차량의 실시간 동작성을 검증하였다. FTP 사이클에 대한 실시간 시뮬레이션 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 통해 엔진과 모터를 함께 사용하여 차량이 동작하는 것을 확인하였다. 본 모델을 활용하여 EGR 과 WGT 등의 엔진 과도 특성을 고려한 최적 동력분배 제어 알고리즘 개발 및 검증이 가능하다.

6. 결론

- 1) 공기순환계를 포함한 디젤 엔진의 평균값 모델을 구성하였다. 정상상태 시험데이터로부터 엔진 맵을 얻었고, 이를 적용하여 단품 별로 모델의 타당성을 검증하였다.
- 2) 과도상태 시험데이터를 적용하여 엔진의 과도 특성을 포함하도록 맵을 보정하였고, 엔진 통합 모델 시뮬레이션 결과와 시험데이터 비교를 통해 모델 검증을 수행하였다. 일부 과도특성이 심한 데이터의 경우 부분적으로 오차가 크게 존재하지만 전반적인 데이터의 경우 과도상태 특성을 포함하여 5% 이내의 오차를 가지는 정확한 모델을 구현하였다.
- 3) 제안된 평균값 디젤 엔진을 하이브리드 차량 모델에 연결하였고, 이를 HILS 환경에 적용하여 모델의 실시간 성능을 검증하였다. 따라서 ECU 및 VCU(Vehicle control unit) 개발 및 검증에 제안된 모델을 활용할 수 있다.
- 4) 향후 제안된 모델을 이용하여 하이브리드 차량

에서 EGR과 WGT의 효과를 고려한 동력분배 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원(“1리터카급 디젤 하이브리드 원천 기술 개발”, ‘10047586’)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2017-2012-0-00628).

References

- 1) L. Guzzella and A. Amstutz, “Control of Diesel Engines,” IEEE Control Systems Magazine, Vol.8, No.9, pp.55-71, 1998.
- 2) M. Ammann, N. P. Fekete, L. Guzzella and A. H. Glattfelder, “Model-Based Control of the VGT and EGR in a Turbocharged Common-Rail Diesel Engine: Theory and Passenger Car Implementation,” SAE 2003-01-0357, 2003.
- 3) I. S. Park, Y. S. Park, S. W. Hong, J. S. Chung, J. W. Sohn and M. H. Sunwoo, “Nonlinear Static Model-based Feedforward Control Algorithm for the EGR and VGT Systems of Passenger Car Diesel Engines,” Transactions of KSAE, Vol.21, No.6, pp.135-146, 2013.
- 4) D. Zhao, R. Stobart, G. Dong and E. Winward, “Real-Time Energy Management for Diesel Heavy Duty Hybrid Electric Vehicles,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.23, Issue 3, pp.829-841, 2015.
- 5) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York, 1988.
- 6) J. W. Jung, N. H. Kim, C. H. Lim, D. J. Kim and K. Y. Kim, “Development of the Calibration Method for the Boost Pressure and EGR Rate of a WGT Diesel Engine Using Mean Value Model,” Transactions of KSAE, Vol.24, No.3, pp.319-329, 2016.