

GCI 차량 개발을 위한 엔진 캘리브레이션과 마일드 하이브리드화를 통한 미래 환경 규제 대응

원 현 우*

아람코 프랑스 연구소

ECU Calibration on GCI Vehicle and Solution by Mild Hybridization for Future Emission Standards

Hyun-Woo Won*

Fuel Research Center, Aramco Overseas Company B. V., 232 Av. Napoleon Bonaparte, Rueil-Malmaison 92500, France

(Received 4 August 2021 / Revised 11 August 2021 / Accepted 21 August 2021)

Abstract : A conventional four-cylinder, 1.6 L stock CI engine that runs on straight-run gasoline fuel with higher reactivity was calibrated by using a DoE(Design of Experiments) test under global operating conditions, prior to the final calibration on a roller test cell. Final vehicle tests were conducted on a vehicle that was adapted to the new fuel specificities. Based on the roller tests, it was concluded that the straight-run gasoline fuel that ran on a compression ignition(GCI) engine could fulfill the Euro 6d standard with the further possibility of CO₂ benefits(reaching the 2025 CO₂ target in Europe). Moreover, vehicle simulation was used to address the possibility of combining GCI with hybrid electric technologies to meet the European CO₂ target by 2030. The target was reached by using a 48 V 1 kWh battery, P2 architecture, and the re-optimization of the vehicle control unit for further advantage. The after-treatment system(ATS) control logic was also optimized to comply with new pollutant standards.

Key words : CO₂ target(이산화탄소 규제치), Gasoline compression ignition(가솔린 자연 착화), Mild hybrid electric vehicle(마일드 하이브리드 차량), Straight-run gasoline(Straight-run 가솔린), Vehicle calibration(차량 캘리브레이션)

Subscripts

- DOC : diesel oxidation catalyst
- DoE : design of experiments
- DPF : diesel particulate filter
- ECU : electric control unit
- GCI : gasoline like fuel on compression ignition engine
- NEDC : new European driving cycle
- SCR : selective catalytic reduction
- WLTC : worldwide harmonized light vehicles test procedures

1. 서론

최근 자동차 보급의 증가는 Non-OECD(Organization for Economic Cooperation and Development), 중국과 인도 같은 나라들의 보급 증가가 주된 요인이다. 이로 인해 내연기관을 완전히 전동화 차량으로 대체하고 전기 충전 인프라를 갖추기 위해서는 아직도 상당한 기간이 걸릴 것으로 보인다.¹⁻⁵⁾ 이런 환경 속에서 전동화 차량에 대한 연구는 물론이고 내연기관 분야에 있어서도 보다 높은 연비와 성능 향상을 통해 환경 문제를 해결하기 위한 노력이 계속적으로 필요한 상황이다. 이런 이유로 열역학적으로 우수한 효율을 갖는 압축착화 방식 엔진에, 클린 가솔린 연료가 사용됨으로써 연비 향상과 배출가스 저감이 가능하다는 연구 결과가 보고되고 있다. GCI 엔진

*Corresponding author, E-mail: hyunwoo.won@aramcooverseas.com

[†]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.

은 실제 가솔린 같은 연료를 압축 착화 엔진에 사용하는 방식으로써, 현재 많은 연구가 진행되었다.⁶⁻¹⁰⁾ 본 연구 또한 지난 논문(Potential of Naphtha fuel on a light duty single cylinder compression ignition engine)에서¹¹⁾ 소개되었던 단기통 엔진에서의 Straight-run 가솔린 연료가 GCI 엔진에서 연소할 때의 연소 특성들을 기반으로 다기통 엔진에서의 캘리브레이션(Calibration)을 통해 최종 엔진 맵을 개발하였다. DoE(Design of Experiments)를 이용한 엔진 ECU(Electric Control Unit) 캘리브레이션으로 엔진의 연비 개선과 후처리장치 효율 향상을 기대할 수 있다. 본 연구의 목적은 GCI 엔진 차량 개발을 통해 Straight-run 가솔린 연료가 차량에 사용 가능함을 증명하는데 있다. 개발된 GCI 차량으로 차량 동력 실험을 통해 WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) 실험을 수행하였으며 그 결과, GCI 차량이 배출가스 규제치를 만족하였다. 뿐만 아니라, 1D 차량 시뮬레이션을 통해 GCI 차량의 마일드 하이브리드화가 유럽에 다가오는 이산화탄소와 배출가스 규제에 상응한다는 것을 확인하였다.

2. GCI 차량 실험

2.1 GCI 엔진의 사용 연료

Straight-run 가솔린 연료는 원유의 증류 과정 중 30~180 °C에서 생성되어지는 연료이다. 이 연료는 C₅에서 C₁₁의 탄화수소 화합물로서 일반적으로 40-70 RON의 낮은 옥탄가를 갖는다. 원유의 증류 과정에서 직접 생성되는 연료이므로 현재 사용되는 가솔린과 디젤 연료보다 간단한 정유 과정을 갖는다. 뿐만 아니라 Straight-run 가솔린 연료는 일반 가솔린 연료보다 낮은 안티 노크성으로 자연 착화 방식 엔진에 적용이 가능하다. Table 1은 본 연구에 사용된 연료와 기존 가솔린과 디젤 연료의 특성을 비교한다.

Table 1에서 보는 것처럼 Straight-run 가솔린은 기존 가

솔린과 디젤 연료에 비해 높은 발열량과 높은 H/C를 가지고 있고 이로 인해 엔진에 사용시 연료로부터 최소 3.5%의 이산화탄소 저감 효과를 기대할 수 있다. 뿐만 아니라, 연료의 정유 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양이 가솔린의 경우 18 g/MJ인데 반해, Straight-run 가솔린은 보다 낮은 12 g/MJ로 전과정 환경 영향적인 면에서 저탄소 연료임을 알 수 있다.¹²⁾

2.2 GCI 엔진 캘리브레이션과 후처리장치 개발

GCI 엔진의 ECU 캘리브레이션을 위해 1.6리터 4기통 엔진이 사용되었고 엔진 사양과 연료 분사 시스템의 정보는 Table 2와 같다. 디젤 분사 시스템 사용을 위해 연료에는 윤활첨가제를 추가했으며(1,000 ppm of Paradyne), 분사 노즐의 분사량을 높인 것 외에 상용 디젤 엔진의 기존 장치들을 모두 재사용함으로써 GCI 엔진을 개발할 수 있었다.

캘리브레이션을 통한 GCI 엔진맵을 개발하기 위해서는 엔진 운영 구간에 대한 정의와 캘리브레이션의 대상인 도메인(파라미터)들을 선택하고 이들의 관계와 상호작용에 대한 해석을 DoE를 이용하여 진행하는 작업이 반복 수행되어야 한다. 이 작업을 통해 최적의 수치값이 계산되어지고 각 도메인들을 셋팅함으로써 ECU를 캘리브레이션이 가능하게 된다. 이를 위해, 본 실험에서는 오픈 ECU를 이용하여 복잡하고 다양한 파라미터들을 통계적 모델(Statistical model)로 해석하는 방식을 사용하였다.¹³⁾ 본 논문에 사용된 DoE 소프트웨어는 ICE²이다.¹⁴⁾

열간 WLTC 실험 구간을 기본으로 엔진 운영구간을 설정하였는데, Fig. 1에 보이듯이, 2,750 rpm까지의 엔진 속도와 높은 부하 영역을 캘리브레이션 구간으로 설정하였다. 뿐만 아니라, WLTC 초기 엔진 오일과 냉각수에 따른 저온 구간을 구현하기 위해 섭씨 25도, 40도, 60도의 냉각수 온도에서의 엔진 캘리브레이션 또한 추가적으로 수행하였다. 이와 같이 엔진 속도, 부하와 냉각수 온도에 따른 엔진 구간의 설정 후, 엔진 캘리브레이션을

Table 1 Test fuel properties compared to diesel and gasoline

Fuel	Gasoline	Diesel	Straight-run gasoline
Cetane number [-]	19.4	53	35
RON [-]	91	-	45
T10, T50, T90 [°C]	25, 105, 151	210, 281, 335	74, 104, 164
H/C ratio [-]	1.82	1.85	2.14
Density [kg/L at 15 °C]	0.749	0.834	0.726
Aromatics [%v/V]	26.8	25	< 5
LHV [MJ/kg]	42.8	42.7	43.8

Table 2 Specification of engine and nozzle

Engine & nozzle	4-cylinder engine
Displacement volume [L]	1.560
Bore [mm] × stroke [mm]	75.0 × 88.3
Compression ratio [-]	16 : 1
Swirl number [-]	2.0
Injector	Bosch, CRI 2.2
Hydraulic flow [cc/30s · 100 bar]	340 (280 for diesel)
Nozzle holes [-]	7

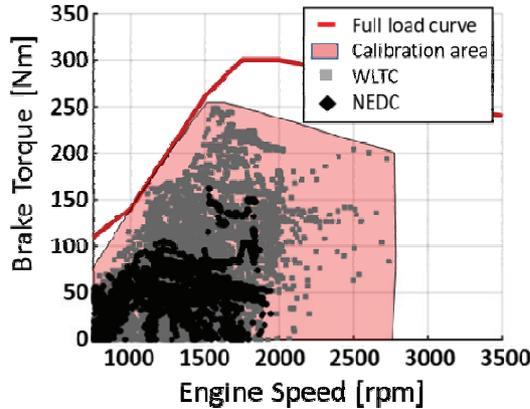


Fig. 1 WLTC and NEDC coverages

위해 도메인들을 결정하였는데, 본 실험은 예를 들어, 엔진 속도, 엔진 부하, 냉각수 온도, 흡기 압력, 흡기 질량, VGT(Variable Geometry Turbine) 위치, 연료 분사 압력, 메인 연료 분사 시작점(Start of injection, through FMB 50), 파일럿 연료 분사량과 파일럿 연료 분사 드웰 타임(Pilot dwell timing)까지 10개의 도메인들을 선택하였다. GCI 엔진 개발에 있어 연료 분사 방식의 최적화가 중요하다. 분사 시기적으로 디젤 연료보다 GCI 연료는 낮은 세탄가로 인해 긴 착화 지연의 시간을 가짐으로써 보다 높은 예혼합 효과를 보인다. 이는 분사 방식에 있어서는 일반적 디젤 엔진의 경우, 다분사, 최대 5 분사(파일럿1, 파일럿2, 메인, 포스트1, 포스트2)로 구성되는데, 단기통 실험에서 증명했듯이, GCI 엔진의 경우 2중 파일럿 분사의 효과가 적고 2중 포스트 분사의 경우도 후처리기관의 활성화를 위한 배기가스 온도 상승 이외에는 아무런 연소 개선 효과가 없어 본 실험에서는 파일럿1과 메인 분사만을 도메인으로 설정하였다. 도메인의 설정 후, DoE를 통해 이 도메인들의 최적의 수치를 결정하기 전에 엔진 실험을 통해 각 도메인들의 운영 구간을 정하였다. DoE의 수치해석으로 얻은 결과물 즉, 도메인들을 최적화한 값은 엔진 실험을 통해 다시 검증되었고 여기에서 측정된 배출가스와 온도를 기준으로 후처리장치 개발이 진행되었다. 후처리장치에는 크리깅 모델(Kriging models)을 이용한 DOC(Diesel Oxidation Catalyst), SCR(Selective Catalytic Reduction)와 DPF(Diesel Particulate Filter)의 최적 효율이 적용되었다.^{15,16)}

모든 캘리브레이션 작업은 개발자가 규정한 규제 안에서 이루어지는데, 본 실험에서는 최소의 이산화탄소를 목표로, 연소 소음의 규제, 연소 안정화(Stability) 규제에 충족되는 선에서 이루어진 값이다. 또한 엔진 운영의 유연성을 위해 영역의 변경에 따른 엔진 장치들의 응답성 또한 고려하였다. 이 결과치들은 INCA 소프트웨어를

통해 오픈 ECU에 입력되어지고 차량에 GCI 엔진을 장착함으로써 GCI 차량의 차량 동력 실험이 가능할 수 있었다.

2.3 GCI 차량 실험 결과

엔진 캘리브레이션과 엔진 실험을 통해서 개발된 GCI 엔진이 장착된 차량의 Cold WLTC (Start at 20 °C) 실험을 차량 동력 장치에서 시행하였다. 본 차량은 유럽 모델 차량으로써(C-segment), 후처리 장치로는 DOC, SCR과 DPF를 장착하였다. Fig. 2는 GCI 차량 실험을 통한 배출가스와 이산화탄소의 시간당 배출량(회색)과 축적 배출량(컬러)을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 실험 초기에 엔진으로 부터의 불완전 연소 가스와 낮은 후처리 장치의 효율로 인해 많은 배출가스가 저온영역에서 배출되었다. 하지만 후처리장치의 활성화 후에는 높은 효율과 함께 보다 적은 배출량 증가세를 보이며 최종적으로 Straight-run 가솔린 연료를 사용한 GCI 차량이 규제치(점선)보다 적은 탄화수소와 일산화탄소의 배출량들을 보였고 질소산화물의 경우, 규제 80 mg/km보다 적은 50 mg/km를 배출함으로써 본 차량이 Euro 6d 규제에 적합함을 보였다. 이산화탄소의 경우도 기존 차량에 사용한 연료와 비교해서 약 7%의 저감 효과를 보임으로써 GCI

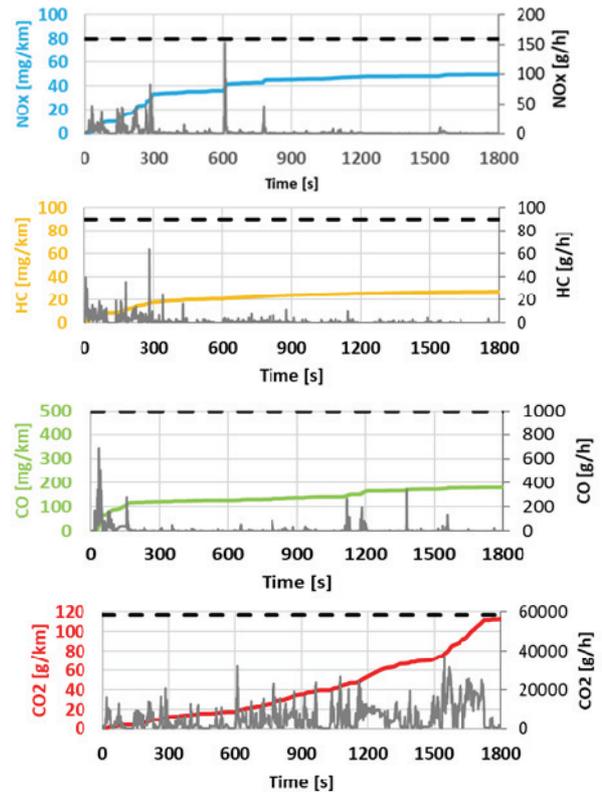


Fig. 2 Tailpipe emissions from GCI vehicle tests (cold WLTC)

엔진이 연비 저감 효과가 있음을 증명하였다. 이 이산화탄소 저감은 3.5%의 연료 특성으로부터의 효과와 3.5%의 연소 개선 효과라 하겠다.

3. GCI 마일드 하이브리드 차량 시뮬레이션

GCI 차량이 유럽의 미래 이산화탄소 규제에 부합하기 위해서는 보다 많은 이산화탄소 저감이 요구된다. 이를 위해 차량의 하이브리드 전동화가 필요한 상황이며 본 논문에서는 GCI 차량의 규제 상용 가능성을 알아보기 위해 1D 차량 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 GCI 하이브리드 차량 시뮬레이션 단계

마일드 하이브리드화를 통한 GCI 차량의 이산화탄소 저감 효과를 알아보기 위해 AMESIM tool이 사용되었다. 엔진 캘리브레이션에서 사용했던 엔진 모델과 후처리장치 모델을 재사용함으로써 하이브리드 전동화 시뮬레이션 과정에서 엔진과 후처리장치를 다시 최적화(Re-optimization)하는 단계를 거칠 수 있었다. 즉, 초기 단계에서 기존 엔진맵을 통해 차량의 하이브리드화에 따른 효과를 하이브리드 모델로 수행한 후, 결과물에 따라 엔진과 후처리장치 모델들을 다시 최적화하는 단계를 반복 수행함으로써 최종 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 GCI 하이브리드 시뮬레이션 모델

차량의 추가 경비 절감과 최소의 전동화로 다가오는 이산화탄소 규제에 상응하는 GCI 차량 개발을 위해 48 V P2(기어 입력 샤프트에 전기모터 연결하는 방식) 형식의 마일드 하이브리드를 선택하였다. 48 V 마일드 하이브리드는 전기 모터가 엔진 동력을 보조하는 병렬형 시스템이다.

Fig. 3은 하이브리드 시뮬레이션 모델의 전체도를 나타낸다. DRIVE(엔진 모델), VEHICLE(차량 모델)과

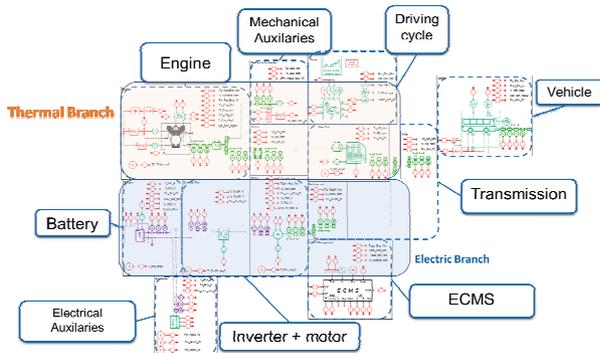
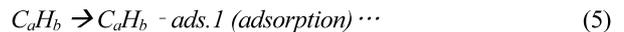
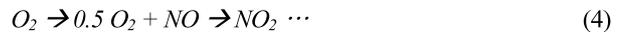
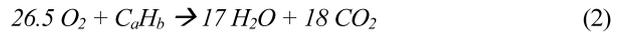


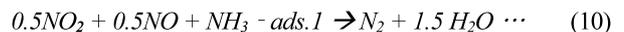
Fig. 3 Sketch of GCI hybrid vehicle simulation

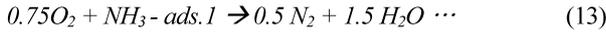
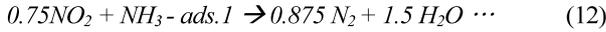
EXHAUST(후처리장치 모델)는 GCI 차량 실험에서 얻은 결과치를 이용하여 모델의 적합성을 체크하였고 차량 컨트롤은 AMESIM 소프트웨어의 HOT(Hybrid Optimization Tool)을 이용하여 엔진과 전기 모터의 사용 범위를 결정하였다. 전동화 장치들(배터리 용량, 전기 모터 용량, 인버터 등)은 시뮬레이션의 수행 중 배터리 충전 상태(SOC)와 연비(이산화탄소) 계산을 통하여 최종적으로 결정하였다. 이를 위해, 차량 제어 시스템에 ECMS(Equivalence Consumption Minimization Strategy)가 사용되었다. 차량 모델(VEHICLE)에는 GCI 차량(총중량 1,500 kg, 타이어정보 2205/55 R 16)이 사용되었고 차량 상수(K1 119.9, K2 1.96, K3 0.394)를 이용하여 주어진 실험 환경(NDEC, WLTC)에서의 차량에 요구되는 출력을 계산하였다.

후처리장치의 경우에는 엔진 실험에서 측정된 배출 가스 온도를 기준으로 DOC와 SCR의 효율 최적화에 집중하였으며, 특히 SCR의 암모니아 분사량 조절을 통해 SCR 효율을 최적화할 수 있었다. DOC는 144 mm의 지름과 99 mm의 길이, 0.0889 mm의 벽면 두께와 500 kg/m³의 밀도가 사용되었고 DOC의 화학 반응은 다음과 같다.



SCR의 경우도 DOC와 비슷한 방식으로 측정이 되어지며 화학작용은 다음과 같다.





SCR (Cu)는 144 mm의 지름과 152.4 mm의 길이, 0.1016 mm의 벽면 두께와 750 kg/m³의 밀도가 사용되었다.

3.3 GCI 하이브리드 시뮬레이션 결과

GCI 차량 시뮬레이션은 초기 하이브리드화 이외에도 엔진과 후처리기관 모델의 최적화 작업들을 반복 수행하여 최적의 결과를 얻었다(Hybridization, re-optimization I and re-optimization II). Fig. 4는 GCI 차량의 하이브리드 전동화 과정에서 변화되는 엔진 운영구간의 상황을 나타낸다. Fig. 4a)는 기존 GCI 차량의 엔진 운영 구간을, b) 최종적 단계의 최적화(Re-optimization II)를 통한 엔진 운영구간이다.

그림의 변화에서 볼 수 있듯이 하이브리드화가 진행될수록, 엔진의 운영구간이 좁혀지고 보다 높은 부하 즉, 고효율 구간으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉, 차량의 하이브리드화의 최적화 과정에서 올바른 에너지원이 사용되었을 뿐만 아니라, 기존 엔진의 운영 영역을 최적화하는 작업을 수행하였다. 이를 통해 연비 저감과 배출가스 규제를 만족하는 효과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 GCI 차량의 하이브리드화 과정에서 엔진 성능 향상을 통한 이산화탄소 최소화 작업 이외에 후처리장치의 효율 향상을 통한 배출가스 저감에도 초점을 두었다. 이는 배출가스 규제를 충족시키기 위한 동시에, 차량 전동화로 기대되는 배출가스 감소량을 이용해 추가적으로 이산화탄소를 저감할 수 있기 때문이다. Fig. 5는 DOC와 SCR 모델을 통한 촉매 후에 계산된 전체 배출가스량을 차량 실험 결과와 비교하였다. 촉매의 효

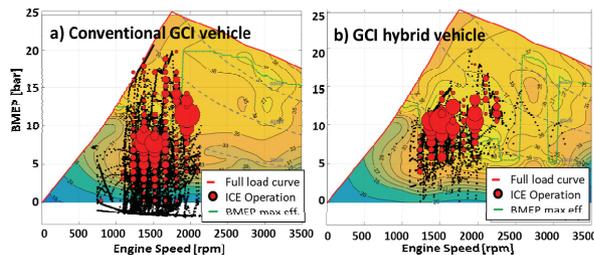


Fig. 4 Different coverages of GCI engine by hybridization (cold WLTC)

율과 배출 가스 온도는 차량 실험에서 측정된 값들을 사용하였다. 저온시 DOC의 낮은 효율과 엔진으로부터의 높은 불완전 연소 가스 배출(Engine-out)로 인해 차량 배출 가스량(Tail-pipe)이 급격히 증가했지만 온도의 상승과 함께 후처리장치의 활성화로 차량 배출량이 느리게 증가함을 알 수 있다. 최종 차량 배출 가스 저감을 위해서는 후처리장치의 활성화가 중요함을 알 수 있다. 이는 차량의 하이브리드화를 통해 저온에서의 엔진 저부하 운영을 최소화한다면 최종적으로 많은 배출가스 저감의 효과를 얻을 수 있음을 나타낸다. 또한 저온 운영시 엔진 부하의 상승은 배출 가스 온도 조절을 통해 후처리장치의 빠른 활성화를 돕게 된다.

SCR의 경우도, 차량 실험을 통해서 측정된 촉매의 효율을 바탕으로 촉매 온도, 암모니아와 질소산화물배출량을 통해 Urea 분사량을 조절함으로써 촉매의 효율을 최적화하였다. 그림처럼 차량 실험과 SCR 시뮬레이션 모델 결과를 비교함으로써 모델을 검증하였다. 차량 실험에서 얻은 Urea 분사량의 정보를 SCR 모델에 적용함으로써 촉매의 온도 변화, 암모니아 포집량과 질소산화물 배출량의 경향이 일치함을 알 수 있다. 이는 또한 엔진 운영 영역 변경 (하이브리드화로)에 따른 질소산화물 배출량 변화에 대응하여 적절한 Urea 분사량 조절이 질소산화물과 암모니아 배출을 통제할 수 있음을 설명한다. SCR 모델은 하이브리드화에 따른 적절한 Urea 분사량 조절에 초점을 두었다.

Fig. 6은 최종적인 하이브리드화에 따른 GCI 엔진 배출 가스(Engine-out)와 차량 배출 가스(Tail-pipe)의 변화들을 비교하였다. 하이브리드화로 엔진으로부터의 낮은 불완전 연소 가스와 다소 높은 질소산화물 배출량을 보였지만, 저온 엔진 운영 저감과 후처리장치의 활성화로

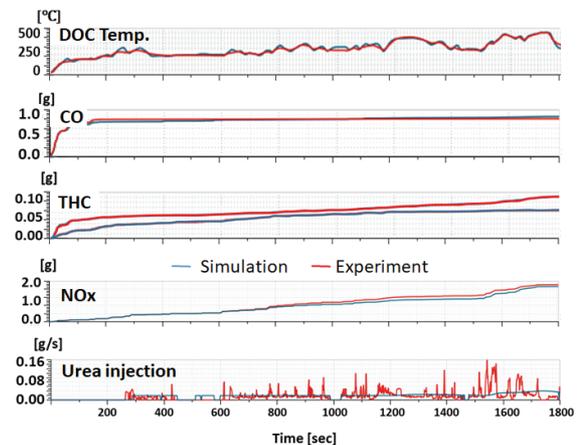


Fig. 5 DOC & SCR model compared to vehicle tests (cold WLTC)

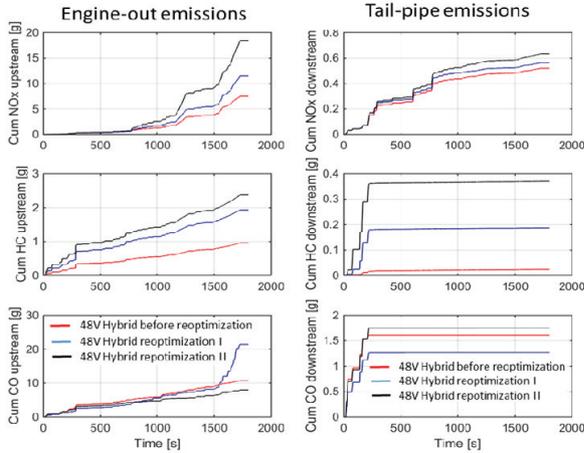


Fig. 6 GCI vehicle engine-out and tailpipe emissions (cold WLTC)

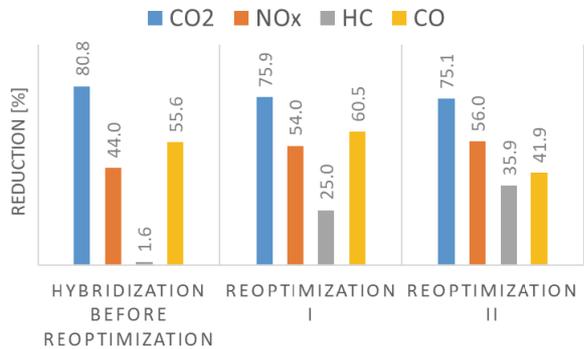


Fig. 7 GCI vehicle emissions reductions by hybridization and optimizations (cold WLTC)

차량 배출가스량은 최종적으로 저감되었다. 초반 하이브리드화(Before re-optimization)의 경우, GCI 하이브리드 차량에서 22 mg/km의 질소산화물, 1 mg/km의 탄화수소와 68 mg/km의 일산화탄소 배출량을 보였다. 이는 기존 GCI 차량 배출 가스 결과량보다 그리고 배출 가스 규제치보다 현저히 낮은 수치이다(하지만 촉매 없이 규제를 만족할 수 있는 수준은 아니다). 이를 통해 GCI 차량의 하이브리드화 과정에서 배출가스 규제치에 상응함을 보임으로써 보다 많은 이산화탄소 저감을 시도할 수 있었다. 또한 GCI 하이브리드 차량의 엔진과 후처리장치를 재최적화 작업함으로써 추가적인 배출가스 저감 효과를 보였다.

Fig. 7에서 GCI 차량의 하이브리드화를 통하여 이산화탄소 저감율과 배출가스(Tail-pipe) 변화율을 기존 GCI 차량의 배출 가스(100%)와 비교하였다. 실험 조건으로써, 배터리의 SOC는 실험 초기와 실험 후를 같은 수준으

로 유지하였다. GCI 차량이 48 V 배터리와 25 kW의 전기 모터를 이용한 P2 마일드 하이브리드화를 통해 WLTC에서 최대 25%까지의 이산화탄소 저감이 가능함을 나타낸다(NEDC에서 최대 35%의 이산화탄소 저감). 배출가스의 경우, 엔진의 제한적인 운영과 후처리장치의 효율 증가로 모든 배출가스가 저감하는 효과를 보였다. 이는 다가오는 유럽 이산화탄소 규제와 배출가스 규제에 상응하는 수치로써 GCI 차량이 마일드 하이브리드화를 통해 상용화가 가능하다는 것을 증명하였다.

4. 결론

본 논문은 Straight-run 가솔린 연료를 이용한 GCI 엔진을 장착한 차량 개발을 위한 캘리브레이션을 수행하였으며 GCI 엔진의 낮은 이산화탄소 배출량과 마일드 하이브리드화를 통한 추가적인 이산화탄소 저감으로 앞으로의 상용화 가능성을 보였다.

- 1) GCI 엔진맵을 DoE를 이용한 캘리브레이션과 엔진 실험을 통해 결정하였다.
- 2) 엔진맵을 이용한 차량 실험을 통해 GCI 차량의 배출가스와 이산화탄소 배출량이 현 규제치에 상응함을 보였다.
- 3) 차량 하이브리드 시뮬레이션을 이용한 GCI 48 V 마일드 하이브리드 차량의 이산화탄소와 배출가스 저감을 측정하였다.

GCI 차량에 48 V 하이브리드를 적용했을 때, 유럽 미래 이산화탄소와 배출 가스 규제를 만족시키므로 GCI 차량 상용화 가능성을 보였다. 본 논문을 통해 GCI 엔진의 개발 및 생산과 Straight-run 연료의 상용화를 기대하는 바이다.

References

- 1) Chapter 8: Transport IPCC WGIII Fifth Assessment Report, report.mitigation2014.org/report/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf, Accessed 19 October 2015.
- 2) The Outlook for Energy: A View to 2040, ExxonMobil 2016, <http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf>, Accessed 7 Feb 2016.
- 3) World Energy Council, 2011, Global Transport Scenarios 2050, WEC London, http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/wec_transport_scenarios_2050.pdf, Accessed 22 October 2015.
- 4) U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2013, DOE/EIA-0484(2013), [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)

- & <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>, Accessed 22 October 2015.
- 5) BP, Statistical Review of World Energy 2015 Workbook, <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, Accessed 26 August 2015.
 - 6) K. Akihama, H. Kosaka, Y. Hotta, K. Nishikawa, K. Inagaki, T. Fuyuto, Y. Iwashita, J. T. Farrell and W. Weissman, "An Investigation of High Load (Compression Ignition) Operation of the "Naphtha Engine" - a Combustion Strategy for Low Well-to-Wheel CO₂ Emissions," SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol.1, No.1, pp.920-932, 2009.
 - 7) H. W. Won, N. Peters, N. Tait and G. Kalghatgi, "Sufficiently Premixed Compression Ignition of a Gasoline-like Fuel Using Three Different Nozzles in a Diesel Engine," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.226, No.5, pp.698-708, 2012.
 - 8) D. Kim, K. Kim and C. Bae, "Combustion and Spray Characteristics of Diesel and Gasoline in Heavy-duty Compression Ignition Engine Under Low Load Condition," Transactions of KSAE, Vol.28, No.6, pp.367-373, 2020.
 - 9) M. Kim, J. Lim, K. Kang and S. Lee, "A Study on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Premixed Gasoline/Pilot Diesel," Transactions of KSAE, Vol.25, No.3, pp.326-335, 2017.
 - 10) K. Cho, E. Latimer, M. Lorey, D. J. Cleary and M. Sellnau, "Gasoline Fuels Assessment for Delphi's Second Generation Gasoline Direct-Injection Compression Ignition (GDCI) Multi-Cylinder Engine," SAE 2017-01-0743, 2017.
 - 11) H. W. Won, A. Bouet, F. Duffour and L. De Francqueville, "Potential of Naphtha Fuel on a Light Duty Single Cylinder Compression Ignition Engine," Proceeding of FISITA, 2016.
 - 12) M. Wang, H. Lee and J. Molburg, "Allocation of Energy Use in Petroleum Refineries to Petroleum Products," The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.9, No.1, pp.34-44, 2004.
 - 13) A. Borràs Nadal, M. Castagné, J. Kermani, F. Nicolas, P. Degeilh, T. Brichard and V. Poquet, "Application of Global Model Based Calibration Methodology to Optimize a 2.3 Litre Diesel Engine with SCR on WLTC Cycle," IAV Conference, 2015.
 - 14) C. Knobel, K. Röpke, B. Barzantny and S. Schaum, DoE Model driven Alternatives to Map-Based ECU Software Structures, Verlag Moderne Industrie, 2005.
 - 15) C. Chaillou, A. Bouet, A. Frobert and F. Duffour, "After-treatment Investigation on Particulates Characterization and DPF Regeneration of a Naphtha Fuel in a Compression Ignition Engine," SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol.9, No.3, pp.633-649, 2016.
 - 16) C. Chaillou, A. Bouet, A. Frobert, and F. Duffour, "Diesel Oxidation Catalyst and HC Investigations of a Low RON Gasoline Fuel in a Compression Ignition Engine," SAE 2017-01-2405, 2017.