

저부하 운전에서 이중연료 예혼합압축착화와 디젤 연소 비교

박 현 욱¹⁾ · 심 의 준¹⁾ · 배 충 식^{*1)}

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Comparison of Dual-fuel Premixed Charge Compression Ignition and Diesel Combustion in Low Load Operations

Hyunwook Park¹⁾ · Euijoon Shim¹⁾ · Choongsik Bae^{*1)}

Korea Advanced Institute of Science and Technology¹⁾

Key words : Dual fuel(이중연료), Natural gas(천연가스), Diesel(디젤), Energy balance(에너지 평형), Thermal efficiency(열효율), unburned hydrocarbon(미연 탄화수소), carbon monoxide(일산화탄소)

* 배충식, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

이중연료 예혼합압축착화(dual-fuel premixed charge compression ignition, DF-PCCI) 연소는 일반 디젤 연소의 문제점으로 지적되는 질소산화물 및 입자상물질을 동시에 저감 가능한 신연소 기술 중 하나이다. DF-PCCI 연소는 흡기행정에 가솔린, 천연가스와 같은 저반응성 연료를 공기와 함께 공급하여 공기-연료 예혼합기를 형성시키고, 압축행정에 디젤, 바이오디젤과 같은 고반응성 연료를 실린더 내로 직접 분사하여 앞서 형성된 예혼합기의 점화원으로 활용하는 연소 방식이다.

내연기관 연료로서 천연가스는 저탄소 연료로 이산화탄소 배출 저감에 이점을 갖고 있다. 또한 세일 가스 등 풍부한 매장량은 기존 디젤 연료 대비 천연가스의 뛰어난 가격경쟁력을 뒷받침하고 있다. DF-PCCI 연료로서 천연가스는 가솔린 대비 낮은 반응성으로 인해, 고부하 운전영역에서 최고압력상승률(maximum pressure rise rate, MPRR)을 줄일 수 있다. 따라서 천연가스-디젤 DF-PCCI 연소는 가솔린-디젤 DF-PCCI 연소 대비 넓은 운전영역에서 질소산화물 및 입자상물질 배출 저감이 가능하다. 그러나 천연가스의 낮은 반응성은 DF-PCCI의 저부하 운전영역에서 낮은 열효율, 높은 미연 탄화수소 및 일산화탄소 배출을 초래한다. 따라서 DF-PCCI 연소의 저부하 운전영역이 제한되고, 디젤 연소로의 전환이 불가피하게 된다.

본 연구에서는 천연가스-디젤 DF-PCCI 연소의 저부하 운전영역에서 발생하는 문제점들을 해결하기 위한 운전전략을 제시하고, 이를 일반 디젤 연소와 성능 및 배기 배출 특성 측면에서 비교하였다. 본 연구에 활용된 엔진은 대형 디젤엔진을 연구 목적에 맞게 DF-PCCI 연소 구현이 가능하도록 개조하였다. 천연가스는 흡기포트를 통해 실린더 내로 유입하여 천연가스-공기 예혼합기를 형성하였고, 디젤은 커먼레일 시스템을 통해 실린더 내로 직접 분사하였다. 실린더 내 압력은 압력센서(Kistler, 6052C)를 통해 측정하였고, 연소 결과 발생하는 배기가스(THC, CO, CO₂, NO_x)는 배기가스 분석기(Horiba, Mexa-7100 DEGR)를 통해 측정하였고, Smoke는 Smoke meter(AVL, 415S)를 통해 측정하였다. 엔진 실험조건으로는 대표적 저부하 운전영역인 0.3 ~ 0.6 MPa indicated mean effective pressure (IMEP)로 선정하였다. 본 연구에서 DF-PCCI 연소로 질소산화물 및 입자상물질 배출을 줄이기 위해, 해당 배출물을 EURO VI(질소산화물 < 0.4 g/kWh, 입자상물질 < 0.01 g/kWh)보다 낮은 수준으로 유지하였고, 실화 방지를 위해 COV of IMEP는 5% 미만으로, 엔진 손상을 막기 위해 최대압력상승률(MPRR)은 1 MPa/CAD로 제한하였다.

디젤 분사시기(start of injection, SOI)와 천연가스 비율 조절을 통해 저부하 운전영역에서 높은 열효율과 위의 제한조건을 만족하는 baseline DF-PCCI 연소를 구현하였다. 실험한 모든 저부하 운전영역(0.3, 0.45, 0.6 MPa IMEP)에서 질소산화물 및 입자상물질 배출 저감을 동시에 달성할 수 있었으나, 운전부하가 감소할수록 열효율이 급격히 감소하고, 높은 탄화수소 및 일산화탄소 배출을 보였다. 이는 운전부하가 감소할수록 희박한 연료-공기 혼합기 형성으로 인해 연소 손실이 증가하기 때문이다. DF-PCCI 연소에서 혼합기 성층 전략(늦은 디젤 SOI, 낮은 천연가스 비율, 높은 배기가스재순환율)을 통해 연소손실을 감소시켰다. 가장 낮은 운전부하인 0.3 MPa IMEP에서 baseline DF-PCCI 연소는 일반 디젤 연소 대비 낮은 열효율을 보였으나, 혼합기 성층 전략을 통해 일반 디젤 연소 대비 높은 열효율을 달성하였다.

본 연구는 환경부 Global-Top Project(글로벌탑 저배기/저탄소 자동차 신연소 원천기술 개발, 20160020001) 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.