

수소의 혼합 비율에 따른 수소/디젤 혼소 엔진의 연소 및 배기 특성 파악

박현욱* · 배충식**

Effects of Hydrogen Ratio on Combustion and Emissions Characteristics of Hydrogen/Diesel Dual-Fuel Engine

Hyunwook Park*, Choongsik Bae**

ABSTRACT

The effects of hydrogen (H_2) ratio on combustion and emission characteristics in a H_2 /diesel dual-fuel engine were investigated. Dual-fuel strategy was applied to improve the control of combustion phasing. The combustion phasing was retarded with increasing H_2 fraction. This can be explained by both reduced diesel concentration and chemical effect of H_2 , which reduce the heat release rate during the low temperature reaction stage. Hydrocarbon and carbon monoxide emissions of the engine were decreased drastically when H_2 ratio was increased.

Key Words : Dual-fuel, Hydrogen, Diesel, Combustion phasing, Carbon dioxide

화석연료 사용으로 인한 이산화탄소 및 각종 배기가스 배출이 전 세계적으로 화두가 됨에 따라 수송 분야에서는 기존 내연기관의 효율 상승 및 청정 연료 사용 등의 전략을 채택하고 있다 [1]. 디젤 엔진의 경우, 가솔린 엔진에 비해 근본적인 연소 방식 차이에 따라 더 높은 효율을 가지게 되지만 디젤 엔진의 고온의 연소 조건에서 발생하는 질소산화물 및 연소실 내 국부적으로 농후한 혼합기에서 발생하는 Soot 배출이 문제점으로 지적되고 있다.

기존 디젤 연소 방식에서 발생하는 질소산화물 및 Soot 배출을 줄이기 위해 적용하는 신연소기술 중 하나가 서로 다른 두 연료의 반응성을 통해 연소상을 제어하는 혼소 엔진이다. 대부분 고옥탄가 연료를 흡기포트 내로 분사하고 고세탄가 연료를 실린더 내로 직접 분사하는 형태를 가진다. 주어진 연료 인프라로 인해 혼소 엔진의 많은 연구들이 가솔린과 디젤을 활용하여 진행되고 있다. 가장 대표적으로 위스콘신에서 널리 연구되고 있는 dual-fuel premixed charge compression ignition (PCCI)가 있다[2-4]. 대형 디젤 엔진을 대상으로 가솔린/디젤 dual-fuel PCCI 모드를 통해 운전 부하 0.46 MPa indicated mean effective pressure (IMEP)부터 1.46 MPa IMEP에 걸

쳐 높은 효율과 함께 미국 2010년 환경보호청 대형 디젤 배기규제를 만족시켰다[4].

본 실험에서 고옥탄가 연료로 사용된 수소의 경우, 탄소 원자를 포함하고 있지 않아 탄화수소, 일산화탄소 등의 탄소계 배출물이 없어 미래 청정 에너지 중 하나로 주목받고 있다. 또한 자발 화온도가 높고 고옥탄가를 가지기 때문에 반응성이 높은 고세탄가 연료를 사용하는 엔진의 연소상 조절에 효과가 있다[5-8].

본 연구에서는 고옥탄가 연료로 수소를 사용하고, 고세탄가 연료로 디젤을 이용하는 혼소 엔진을 구현하여 수소의 혼합비율에 따른 수소/디젤 혼소 엔진의 연소 및 배기특성을 파악하는 것을 목표로 한다.

본 연구에 사용된 엔진은 커먼레일 분사 시스템을 장착한 직접 분사식 단기통 디젤 엔진으로, 엔진의 보어 및 행정은 각각 84, 90 mm이고 배기량은 498 cm^3 이다. 압축비는 16:1이고 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

수소/디젤 혼소 엔진의 구현을 위해, 수소는 가압된 탱크에서 레귤레이터를 거쳐 수소용으로 개조한 상용 압축천연가스용 분사기 (Bosch)를 통해 흡기포트로 분사되었다. 디젤의 경우, 커먼레일 분사 시스템을 통해 실린더 내로 직접 분사하였다. 실린더 내 압력은 압전형 압력 센서 (Kistler, 6056 type)를 통해 측정되었다. 연소 결과 발생하는 배기가스 중 미연 탄화수소, 일산화

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042) 350-3044 FAX : (042) 350-5044

탄소, 이산화탄소, 질소산화물은 배기가스 분석장치 (Horiba, Mexa-1500d)를 통해 측정하였고, 스모크 측정은 스모크 미터 (AVL, 415S)를 통해 이루어졌다. 자세한 실험장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

수소/디젤 혼소 엔진에서 PCCI 영역을 판별하기 위해 디젤의 분사시기를 $-60 \sim 0$ °CA aTDC로 변화시키면서, 미연 탄화수소 및 질소산화물 배출을 측정하였다. 이를 통해 두 배출물이 동시에 저감되는 $-32 \sim -28$ °CA aTDC 영역을 수소/디젤 혼소 엔진의 PCCI 영역으로 지정하였다[8]. 수소의 혼합 비율에 따른 영향을 알아보기 위해 수소의 분사량을 0, 1.5, 2.5, 3.5 mg를 분사하였고, 이는 수소 및 디젤 전체 발열량의 0%, 30%, 50%, 70%에 해당된다. 수소를 분사하지 않은 경우는 디젤 PCCI 모드에 해당되며, 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드와의 비교를 위해 활용되었다. 엔진 운전 속도를 포함한 자세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Engine specification

Engine type	Single-cylinder direct injection
Valves per cylinder	4 (2 intake and 2 exhaust)
Bore X Stroke	84 mm X 90 mm
Displacement volume	498 cm ³
Compression ratio	16:1
Intake valve timing	Open at 10 bTDC Close at 28 aBDC
Exhaust valve timing	Open at 54 bBDC Close at 4 aTDC

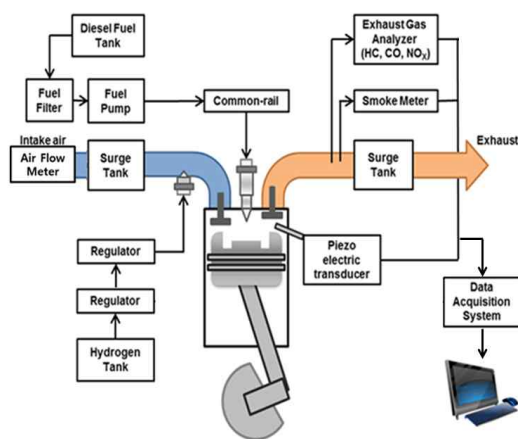
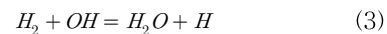
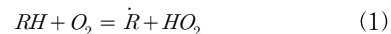


Fig. 1 Experimental setup of a single cylinder direct injection diesel engine

Table 2 Experimental condition

Engine speed	1200 rpm			
Coolant temperature	358 ± 1 K			
Intake temperature	306 ± 1 K			
H2 injection pressure	0.8 MPa			
Diesel injection pressure	60 MPa			
H2 injection timing	-240 oCA aTDC			
Diesel injection timing	-60 to 0 oCA aTDC			
Diesel injection quantity	14.1 mg	9.8 mg	7 mg	4.2 mg
H2 injection quantity	0 mg	1.5 mg	2.5 mg	3.5 mg

Figure 2는 수소 혼합비율 증가에 따른 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드의 열방출율 그래프를 나타낸 것이다. 편의상 수소는 H, 디젤은 D, 총 발열량 중 수소와 디젤이 각각 차지하는 비율을 숫자로 나타내었다. 모든 조건에서 열방출율이 저온산화반응과 고온산화반응에 걸쳐서 일어나는 것을 확인할 수 있다. 고정된 수소와 디젤의 분사시기에서 수소 첨가에 따라 연소상이 지각되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 디젤의 농도 감소 및 수소의 화학적 효과로 설명할 수 있다[5, 6]. 이를 면밀히 분석하기 위해 저온산화반응 부분을 확대한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 디젤의 저온산화반응은 식 (1)과 (2)를 통해 일어나게 되는데, 수소의 혼합비율이 상승할수록 디젤의 농도가 감소하게 되고, 이는 디젤의 저온산화반응 속도 감소 및 열방출량 감소로 이어지게 된다. 또한 수



소가 식 (3)의 반응을 통해 화학적으로 참여하여, 디젤의 저온산화반응 열방출에 필요한 OH 라디칼을 소비하게 된다. 따라서 수소의 혼합비율 증가에 따라 디젤의 농도 감소 및 수소의 화학적 효과로 인해 Fig. 3과 같이 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드의 저온산화반응이 지각되고, 열방출량 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 디젤의 고온산화반응이 일어나는데 필요한 온도에 늦게 도달하게 되고, Fig. 4와 같이 수소의 혼합비율이 증가함에 따라 연소상이 지각되어 IMEP가 증가하게 된다.

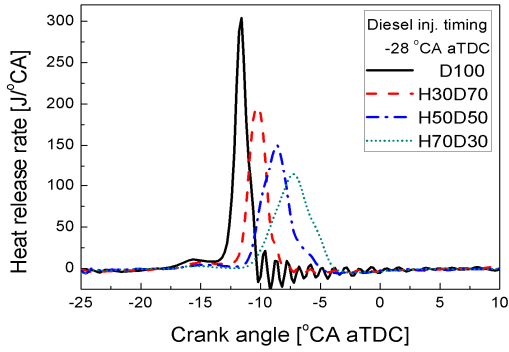


Fig. 2 Heat release rate of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

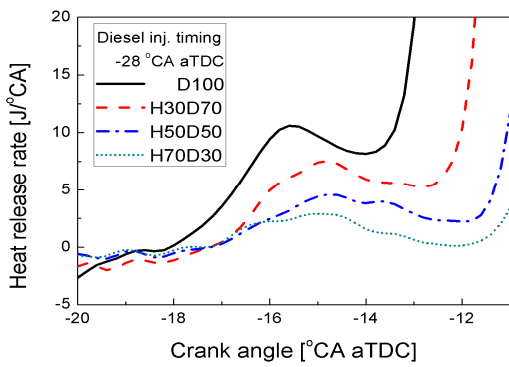


Fig. 3 Low temperature heat release rate of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

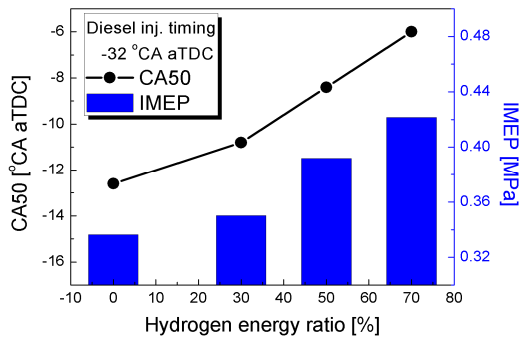


Fig. 4 CA50 and IMEP of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

Figure 5는 수소의 혼합비율에 따른 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드의 탄화수소 및 일산화탄소 배출을 나타낸 것으로, 수소 첨가에 따라 두 가지 배기 배출물이 모두 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄소원자를 포함하지 않는 수소 비율의 증가 및 벽면 적심 현상을 일으키는 디젤의

양 감소를 통해 설명할 수 있다. 또한 수소의 경우, 매우 짧은 소화거리를 가지기 때문에 틈새 체적 등에 있던 타지 못한 연료를 상대적으로 잘 산화시키기 때문에 불완전 연소 배기 배출물이 감소하게 된다.

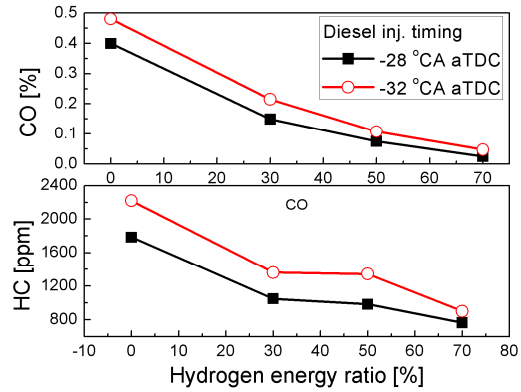


Fig. 5 CO and HC emissions of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

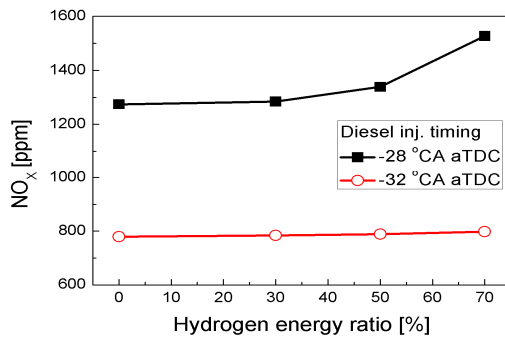


Fig. 6 NO_x emissions of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

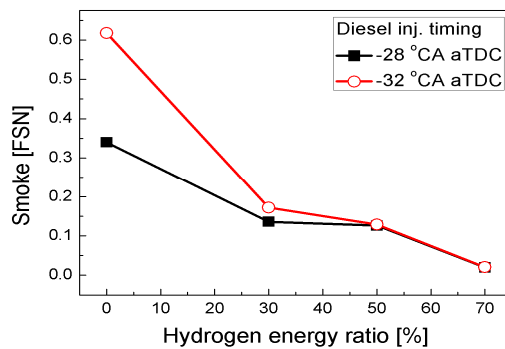


Fig. 7 Smoke emissions of H₂/diesel dual-fuel engine with H₂ enrichment

Figure 6는 수소의 혼합비율에 따른 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드의 질소산화물 배출을 나타낸 것으로, 수소 첨가에 따라 질소산화물 배출이 소폭 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수소 첨가에 따라 수소-공기 예혼합기의 당량비가 상승하게 되어 빠른 연소속도로 인해 실린더 내 최고온도가 상승하기 때문에 질소산화물 배출이 증가하게 된다.

Figure 7은 수소의 혼합비율에 따른 수소/디젤 dual-fuel PCCI 모드의 Smoke 배출을 나타낸 것으로, 수소 첨가에 따라 Smoke 배출이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄소원자를 포함하지 않는 수소의 비율이 증가함에 따라 Smoke 생성 자체가 줄어들었기 때문이다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100100440)

참고 문헌

- [1] *Energy Technology Perspectives 2014 - Harnessing Electricity's Potential*, International Energy Agency, France, pp. 40-43
- [2] S. Kokjohn, R. Hanson, D. Splitter, R. Reiz, "Experiments and Modeling of Dual-Fuel HCCI and PCCI Combustion Using In-cylinder Fuel Blending", SAE Transactions Journal of Engines, 2009, 2(2), pp. 24-39.
- [3] D. Splitter, R. Hanson, S. Kokjohn, M. Wissink, R. Reiz, "Injection Effects in Low Load RCCI Dual-Fuel Combustion", SAE Technical Paper 2011-24-0047.
- [4] S. Kokjohn, R. Hanson, D. Splitter, R. Reiz, "Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI): a Pathway to Controlled High Efficiency Clean Combustion", International Journal of Engine Research, 2011, 12(3), pp. 209-226.
- [5] T. Shudo, H. Yamada, "Hydrogen as an Ignition-Controlling Agent for HCCI Combustion Engine by Suppressing the Low-Temperature oxidation", International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(14), pp. 3066-3072.
- [6] H. Guo, V. Hosseini, W. Neill, W. Chippior, C. Dumitrescu, "An Experimental Study on the Effect of Hydrogen Enrichment on Diesel Fueled HCCI Combustion", International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(21), pp. 13820-13830.
- [7] V. Hosseini, M. Checkel, "Effect of Reformer Gas on HCCI Combustion - Part 2: Low Octane Fuels", SAE Technical Paper 2007-01-0206.
- [8] T. Shudo, Y. Ono, "Ignition Control by DME-Reformed Gas in HCCI Combustion", SAE Technical Paper 2003-01-1824.