

EGR을 활용한 수소 직분사 엔진에서의 NOx 및 미연수소 제어

양 희 태¹⁾ · 기 영 민¹⁾ · 김 정 호¹⁾ · 김 진 수¹⁾ · 배 충 식^{*1)}

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

NOx and Unburned Hydrogen Control in a Hydrogen Direct-Injection Engine using EGR

Heetae Yang¹⁾ · Youngmin Ki¹⁾ · Justin Jungho Kim¹⁾ · Jinsu Kim¹⁾ · Choongsik Bae^{*1)}

Korea Advanced Institute of Science and Technology¹⁾

Key words : Hydrogen(수소), Combustion(연소), Injection Strategy (분사전략), Exhaust Gas Recirculation(배기가스 재순환), Unburned Hydrogen(미연수소), Nitrogen Oxide(질소산화물)

배 충 식, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

수소는 탄소를 포함하지 않는 무탄소 연료로서 내연기관의 차세대 대체연료로 주목받고 있다. 그러나 수소는 낮은 부피 에너지 밀도, 빠른 연소속도와 낮은 점화에너지로 인한 역화와 예연소 문제, 그리고 연소 과정에서 발생하는 높은 온도로 인한 NOx 배출이라는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 극복하기 위해 직분사(Direct Injection, DI) 방식이 중요한 기술로 고려되고 있으며, 분사 전략에 따른 혼합기 형성 상태가 엔진의 성능과 배출 특성을 좌우한다. 따라서 다양한 분사 및 점화 조건에서 혼합 및 연소 과정을 분석하는 것은 수소엔진 최적화를 위해 필수적이다.

최근에는 수소엔진의 NOx 배출 외에도 미연수소배출이 새로운 문제로 부각되고 있다. 수소의 지구온난화지수(GWP)가 이산화탄소의 약 12배에 달한다는 점에서, 수소 사용 과정에서의 누출과 미연 방출은 기후변화에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 수소엔진에서는 NOx와 미연수소라는 두 가지 상반된 배출 특성을 동시에 저감하는 것이 핵심 과제로 떠오르고 있다.

본 연구에서는 1.6 L Kappa 엔진을 기반으로 한 400 cc 단기통 직분식 수소엔진을 활용하여 분사 및 점화 시기가 연소 특성과 배출가스에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. HORIBA MEXA 및 HyEVO 장비를 통해 배출 특성을 정량적으로 측정하였다. 그 결과, 국부적으로 연료가 농후한 혼합기 조건에서는 연소가 상대적으로 빠르게 진행되어 미연수소 배출은 감소했으나 NOx는 증가하였다. 반대로 혼합기가 균질한 조건에서는 NOx가 감소한 반면, 낮은 온도와 압력에서 연소가 진행되며 미연수소가 증가하였다. 이를 통해 혼합기 조건에 따라 NOx와 미연수소 간 명확한 상충관계가 존재함을 확인하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해 적용한 배기가스 재순환(EGR)은 연소실 내 산소 농도를 희석하고 혼합기의 열용량을 증가시켜 연소온도를 낮춤으로써 NOx 배출을 효과적으로 억제하였다. 동시에 적절한 EGR율은 미연수소의 추가적 증가를 억제하여 두 배출물 간 균형을 유지하는 효과를 보였다. 이는 단순히 NOx 저감뿐 아니라 수소의 누출·방출에 따른 환경적 부담을 줄이는 데에도 기여할 수 있음을 시사한다.

따라서 본 연구는 직분식 수소엔진의 연소 및 배출 특성을 종합적으로 분석하고, 혼합기 제어와 EGR 적용을 통해 고 효율·저배출 운전을 달성할 수 있는 전략을 제시하였다. 이는 수소 내연기관의 실질적 활용 가능성을 확대하고, 차세대 친환경 수송 시스템 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment: 본 연구는 2025년 산업통상자원부의 재원으로 “무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소 엔진 원천기술 개발”(NO. 20018437)의 지원에 의한 연구이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.