

직접분사식 수소 엔진에서 분사 전략이 엔진 성능 및 배기 특성에 미치는 영향

배 문 영¹⁾ · 기 영 민²⁾ · 김 정 호²⁾ · 황 준 식²⁾ · 배 충 식^{*2)}

이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부¹⁾, 한국과학기술원 기계공학과²⁾

Effect of Injection Strategy on Engine Performance and Emission Characteristics in a Direct-Injection Hydrogen Engine

Munyoung Bae¹⁾ · Youngmin Ki²⁾ · Jungho Justin Kim²⁾ · Joonsik Hwang²⁾ · Choongsik Bae^{*2)}

Ewha Womans University¹⁾, Korea Advanced Institute of Science and Technology²⁾

Key words : Hydrogen engine(수소 엔진), Injection strategy(분사 전략), Mixture formation(혼합기 형성), Split injection(다단 분사)

* 교신저자, E-mail: 배충식, csbae@kaist.ac.kr

탄소중립 사회로의 전환이 가속화됨에 따라, 수송 부문의 탈탄소화를 위한 대체 에너지원으로 수소가 주목받고 있다. 수소는 연소 시 CO₂를 배출하지 않으며 넓은 가연 범위와 빠른 연소 속도를 바탕으로 희박 조건에서도 안정적인 연소가 가능하다. 이러한 특성으로 인해 수소 내연기관은 기존 엔진 기술을 활용하면서 탄소중립을 달성할 수 있는 유망한 대안으로 평가된다. 그러나 수소 연소는 실린더 내 혼합기 분포 및 국부 당량비에 크게 의존하며, 이에 따라 연소 특성 및 NO_x 배출이 크게 달라질 수 있다. 특히 직접분사식 수소 엔진에서는 분사 전략이 혼합기 형성 및 성층화 정도를 좌우하는 중요한 영향을 미친다.

본 연구에서는 직접분사식 수소 엔진에서 분사 전략이 혼합기 형성, 엔진 성능 및 배기 특성에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 실험은 1.6 L Kappa 엔진을 기반으로 한 400 cc 단기통 직분식 수소 엔진을 이용하여 수행되었으며, 단일 분사 및 다단 분사 전략을 적용하여 비교 분석하였다. 단일 분사의 경우, 분사 시기를 지연시킬수록 혼합기의 성층화 정도가 증가하였으며, 이는 연소 기간 단축과 열 손실 감소로 이어져 IMEP가 향상되는 경향을 보였다. 반면, 점화 위치 주변에 국부적으로 농후한 영역이 형성됨에 따라 연소 온도가 상승하여 NO_x 배출이 증가하는 특성이 나타났다. 다단 분사에서는 1차 분사를 통해 전반적으로 희박한 혼합기를 형성하고, 2차 분사를 통해 점화 플러그 주변에 국부적으로 농후한 혼합기를 조성함으로써 연소 속도를 효과적으로 향상시킬 수 있었다. 구체적으로 1차 및 2차 분사 비율과 2차 분사 시기를 변화시키며 그 영향을 분석한 결과, 2차 분사 비율이 증가하거나 분사 시기가 지연될수록 성층화 정도가 증가하여 연소 속도 및 IMEP가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 동시에 국부 농후 영역의 형성으로 인해 NO_x 배출 또한 증가하는 경향이 나타났다. 한편, 2차 분사 시기를 적절히 지연시키는 경우, 단일 분사 수준의 NO_x 배출량을 유지하면서도 유의미한 IMEP 향상이 가능한 조건이 존재함을 확인하였다.

본 연구를 통해 직접분사식 수소 엔진에서 분사 전략이 혼합기 성층화와 연소 속도, 엔진 성능 및 배기 특성을 결정하는 주요 변수임을 실험적으로 입증하였다. 특히 다단 분사 전략을 통해 성능 향상과 배기 저감을 동시에 달성할 수 있는 운전 조건이 존재함을 확인하였으며, 이는 향후 수소 직접 분사 엔진의 분사 및 연소 제어 전략 수립에 중요한 기초 자료를 제공한다.

Acknowledgment: 본 연구는 2026년 산업통상부의 재원으로 “탄소중립 및 CO₂ 규제 대응 세계최고수준 Heavy Duty용 11L급 직분식 수소엔진 기술개발” (No. P0028449)의 지원으로 수행이 되었습니다.