

수소 DISI 엔진에서 분사압력이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

김 정 기¹⁾ · 구 준 모²⁾ · 김 기 연²⁾ · 김 정 호³⁾ · 이 승 현³⁾ · 장 일 품²⁾ · 김 나 연²⁾ · 문 파 란²⁾ · 장 준²⁾ · 명 차 리³⁾
· 민 경 덕³⁾ · 이 정 우^{*2)}

충남대학교 선박해양공학과¹⁾ · 충남대학교 자율운항시스템공학과²⁾ · 서울대학교 기계공학과³⁾

Effects of Injection Pressure on Combustion and Emission Characteristics in a Hydrogen Direct-Injection Spark-Ignition Engine

Junggi Kim¹⁾ · Junmo Koo²⁾ · Kiyeon Kim²⁾ · Jeongho Kim³⁾ · Seunghyun Lee³⁾ · Ilpum Jang²⁾
· Nayeon Kim²⁾ · Paran Moon²⁾ · Jun Jang²⁾ · Chalee Myung³⁾ · Kyongdoug Min³⁾ · Jeongwoo Lee^{*2)}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹⁾

Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University²⁾

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University³⁾

Key words : Hydrogen(수소), Injection pressure(분사 압력), Nitrogen Oxides(질소산화물), Direct injection(직접 분사), Combustion Stability(연소 안정성)

교신저자, E-mail: jwoo@cnu.ac.kr

전 세계적인 탄소중립 요구에 따라 내연 기관의 친환경 연료의 중요성이 커지고 있다. 실제로 140개 이상의 국가와 수많은 기업과 대학들이 유엔 ‘Race to Zero’ 캠페인에 동참하는 등 탄소 중립 선언이 이어지고 있으며, 국내외 자동차 기업들 또한 친환경 연료에 큰 관심을 가지고 있다.

연료 중 수소는 연소 시 탄소가 배출되지 않는 장점이 있으나 질소산화물 생성 및 낮은 점화 에너지(약 0.02mJ)로 인한 조기 점화 및 역화 같은 불안정 연소가 있을 수 있다. 본 연구는 연소 개선 및 질소산화물 생성 문제 해결을 위해 직접분사 수소 엔진에서 분사 압력 제어 전략이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

본 실험은 400cc 급 단기통 엔진에서 1500rpm, $\lambda=2.2$ 조건에서 수소 분사 압력을 40, 50, 60bar로 바꾸어 가며 진행하였다. 각 압력 조건에서 동일한 연료량을 공급하기 위해 분사 기간을 조절하였으며, 목표한 분사 전략(SOI 160, EOI 40)을 구현하기 위해 분사 시점도 제어하였다.

분사 압력이 높을수록 연료가 연소실 내에 균일하게 분포하는 동시에 연소 속도가 빨라져 NOx 생성 시간이 단축되고 이러한 영향은 엔진에 긍정적인 결과를 가져올 것으로 예상하였다. 또한 난류가 유발되어 연소 속도 및 화염 전파가 개선될 수 있다.

SOI 160 조건에서는 이른 분사 시점으로 충분한 혼합 시간이 확보되어 낮은 수준의 NOx 배출량을 확인할 수 있었다. 그 결과, SOI 160 조건에서는 분사 압력을 높여도 NOx 배출의 변화는 미미함을 확인할 수 있었다.

상대적으로 분사 시점이 지각되어 혼합 시간이 부족한 EOI 40 조건에서는 분사 압력의 증가가 효율을 향상시키는 경향을 확인할 수 있었다. 구체적으로 분사 압력이 40bar에서 60bar로 증가함에 따라 NOx 배출은 22.97% 감소하였다. 다른 배기 배출물은 큰 변동 없이 NOx 배출만 상당히 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

공통적으로 SOI 160, EOI 40 조건에서 분사 압력이 증가할수록 MBF50이 진감되는, 즉 연소 속도가 빨라지는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 COV는 분사 압력이 40→50 bar 구간에서 감소했으나 50→60 bar 구간에서는 증가하였다. 다만 그 차이는 미미하여 최대 0.91%에 그쳤으며, 모든 조건에서 안정적인 연소가 유지되었다.

본 연구는 직접분사 수소 엔진에서 분사 압력 제어가 연소 및 배기 특성에 전반적으로 긍정적인 영향을 미쳤으며, 특히 혼합 시간이 부족한 조건(EOI 40)에서 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수 있었다. 향후 다양한 운전 조건과 제어 전략을 확장 적용한다면 수소 엔진의 실용화에 한 발 더 가까워질 것으로 기대된다.

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(P0023684, 산업혁신인재성장지원사업)과 한국산업기술평가관리원(NO. 20018473, 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 개발), 한국연구재단 우수신진연구(NO. 2710082861, 탄소중립 연료 기반 선박의 선상 연료 생산/개질 및 xH₂/수소 융합연소 엔진 통합 시스템의 에너지 효율 분석 연구), 한국연구재단 미래유망융합기술 파이오니어(도전형)(NO. 2710085240, 플라스마 활용 촉매 및 고효율 H₂/CO₂ 저장 기술 기반 on-board 개질기 및 H₂/e-fuel 혼소 엔진 통합 시스템 개발)의 지원을 받아 진행된 연구이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.