

1D 시스템 모델을 활용한 가솔린 직분사 인젝터 응답 특성 개선 연구

윤 현 석*

현대케피코 R&D 사업부

Improving the Response Characteristics of a Gasoline Direct Injection Injector Using a 1D System Model

Hyunsok Yoon

Hyundai Kefico R&D Division

Key words : High-pressure injector(고압인젝터), 1D system model(1D 시스템 모델), Response characteristics(응답 특성), Multi-stage injection(다단분사)

교신저자, E-mail: Hyunsok.Yoon@hyundai-kefico.com

환경 규제의 지속적 강화에 따라 가솔린 직분사(GDI) 엔진에서 다단분사 기술의 중요성이 증대되고 있다. Euro 7과 같은 국제적 배출가스 규제가 강화되면서 자동차 제조사들은 연소 효율 향상과 배출가스 저감을 동시에 달성하기 위한 고도의 엔진 제어 기술을 요구하고 있다. 특히 다단분사는 연료 분사 시점과 분사량을 밀리초(ms) 단위로 정밀하게 제어함으로써 연소 과정을 최적화하고 질소산화물(NO_x)과 미세먼지(PM) 배출을 효과적으로 저감할 수 있는 핵심 기술이다. GDI 엔진에서는 파일릿 분사, 주분사, 후분사 등 여러 단계의 분사를 다단으로 분사하여 연소 특성을 세밀하게 제어하고 있다.

그러나 현재의 고압인젝터는 전기 신호 인가 후 내부 부품(솔레노이드, 제어 밸브, 니들 등)의 거동이 완전히 안정화되기 전에 신호가 종료되는 소유량 구간에서 분사 특성의 비선형성으로 인해 분사량 제어에 어려움을 겪고 있다. 신호가 인가되고 내부 부품의 거동이 충분히 안정화되면, 분사 시간에 따른 연료 분사량은 선형적인 관계를 보이게 된다. 그러나 안정화가 이루어지는 중에 신호가 종료되면 예상된 분사량과 실제 분사량 간에 큰 편차가 발생하게 되며, 이러한 비선형성은 다단분사 제어의 정확도를 저해하여 배출가스 저감 효과를 제한한다. 특히 연속적인 다단분사에서 각 분사 단계 간의 분사량 균일도가 떨어지면 연소 불균형이 발생하여 배출가스 증가로 이어진다.

본 연구는 가솔린 직분사 인젝터의 응답 성능 개선을 통해 소유량 영역에서의 분사 안정화를 달성하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 인젝터 내부의 솔레노이드 코일, 아마추어, 니들, 복귀 스프링, 연료 유로 등 주요 부품의 동역학적 거동을 포함하는 1차원(1D) 시스템 해석 모델을 수립하였다. 1D 모델은 공간적 분포를 1차원으로 단순화하면서도 시간에 따른 부품의 거동을 정확하게 추적할 수 있으므로, 다양한 설계 조건에 대한 빠른 시뮬레이션과 민감도 분석이 가능하다. 개발된 해석 모델을 통해 인젝터의 주요 설계인자(솔레노이드 강성, 스프링 강성, 밸브 노즐 직경 및 길이, 부품 질량, 연료 압력 등)가 응답 시간(열림 지연 시간, 닫힘 시간) 및 분사 유량 특성에 미치는 영향도를 정량적으로 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 응답 성능을 개선하는 설계 최적화 방안을 제시하였으며, 개선된 인젝터 설계는 열림 지연 시간을 단축시키고 니들의 안정화 속도를 가속화할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 구축한 1D 해석 모델을 통해 인젝터 주요 설계인자가 응답 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 소유량 구간에서 발생하는 비선형 분사 특성을 개선할 수 있는 방향을 제안하였다. 향후 3D 전산유체역학(CFD) 해석 및 실험적 검증을 통한 모델 고도화, 그리고 다양한 연료 특성, 온도, 압력 조건에서 분사량의 균일도 및 안정성을 더욱 개선하는 연구로 확장할 예정이다.