

핀틀형 수소인젝터의 제트 운동량플럭스 기반 과도분사율 계측법 개발

이 주 원¹⁾ · 배 규 한¹⁾ · 임 주 완¹⁾ · 문 석 수^{*1)}

인하대학교 기계공학과¹⁾

Development of Jet Momentum Flux-based Transient Injection Rate Measurement

Technique for a Pintle-type Hydrogen Injector

Juwon Lee¹⁾ · Gyuhan Bae¹⁾ · Juwan Lim¹⁾ · Seoksu Moon^{*1)}

Inha University¹⁾

Key words : Hydrogen internal combustion engines(수소 내연기관), Pintle-type injector(핀틀형 인젝터), Momentum flux(운동량플럭스), Transient injection rate(과도분사율)

교신저자, E-mail: 문석수, ss.moon@inha.ac.kr

수송 부문의 탄소중립 달성 필요성이 증가함에 따라, 대표적인 무탄소 연료인 수소를 내연기관에 적용하는 기술이 핵심적인 해결 방안으로 주목받고 있다. 현재 대부분의 수소 내연기관은 체적효율 확보와 이상연소 억제를 위해 직접분사 방식을 채택하고 있으며, 낮은 분사압력에서도 충분한 체적 유량과 실링 성능을 확보하기 위해 바깥개방식 핀틀형 인젝터가 적용되고 있다. 한편, 수소 직접분사식 내연기관에서는 고부하 조건에서 NO_x 배출 증가와 엔진 효율 저하가 주요 문제로 지적되고 있으며, 이를 해결하기 위한 전략으로 성층연소가 주목받고 있다. 성층연소의 안정적인 구현을 위해서는 적절한 시기와 위치에 층상 혼합기를 형성하는 것이 중요하며, 이를 위해 수소 인젝터의 과도분사율은 혼합기의 연료량을 결정하는 핵심 인자로 작용한다. 본 연구팀은 기존 과도분사율 계측 기법인 Bosch-tube법과 Zeuch법이 기상 연료에 적용될 때 가지는 한계를 분석하고, 힘센서를 이용하여 인젝터에서 분사된 수소제트의 운동량플럭스를 측정함으로써 과도분사율을 산출하는 기법을 제안한 바 있다. 그러나 기존에 제안한 기법에서는 초음속 수소제트의 물리량을 엄밀히 측정 및 계산하는 데 한계가 있어, 코리올리 유량계를 통해 측정된 평균 질량유량을 기반으로 보정계수를 적용하였다. 이 경우, 다양한 분사조건에 대해 반복적인 평균 질량유량 측정이 요구되며, 미연 수소 처리를 위한 후처리 장치와 실시간 보정 로직이 필요하여 계측 시스템의 복잡성이 증가하는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고 기법을 단순화하기 위해, 코리올리 유량계를 사용하지 않고 힘센서를 통해 측정된 운동량플럭스만으로 과도분사율을 계측할 수 있는 방법을 개발하였다. 운동량플럭스로부터 과도분사율을 도출하기 위해, 레이놀즈 수송정리에 기반한 1차원 운동량 방정식을 적용하여 과도분사율을 제트의 운동량플럭스와 유속의 함수로 표현하였다. 또한 초음속 수소제트의 유속은 힘센서를 통해 측정된 운동량플럭스의 정상상태 평균값과 압축성유동이론에 기반한 임계 질량유량을 이용하여 산정하였다. 최종적으로 도출된 과도분사율은 다양한 분사 및 분위기 압력 조건에서 코리올리 유량계를 통해 측정된 1회 분사당 질량과 비교하여 검증하였으며, 95% 이상의 정확도를 보이는 것으로 확인되었다. 본 연구는 최소한의 계측 장치 구성과 단순화된 방법을 통해, 저비용으로도 높은 정확도의 수소 과도분사율 계측이 가능함을 제시한다.

*이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호: 20018473)