

힘센서를 이용한 기상 연료의 과도적 분사율 계측에 관한 연구

이재현* · 배규한* · 기영민* · 문석수*[†]

A Study on Transient Injection Rate Measurement of Gas Fuels Using Force Sensor

Jaehyun Lee, Gyuhan Bae, Youngmin Ki, and Seoksu Moon

Key Words: Hydrogen engine(수소엔진), Fuel injection(연료분사), Gas fuel(기상 연료), Injection rate(분사율), Force sensor(힘센서), Momentum flux(운동량 플럭스)

Abstract

For carbon neutrality, direct-injection hydrogen engines are attracting attention as a future power source. It is essential to estimate the transient injection rate of hydrogen for the optimization of hydrogen injection in direct injection engines. However, conventional injection rate measurement techniques for liquid fuels based on the injection-induced fuel pressure change in a test section are difficult to be applied to gaseous fuels due to the compressibility of the gas and the sealing issue of the components. In this study, a momentum flux measurement technique is introduced to obtain the transient injection rate of gaseous fuels using a force sensor. The injection rate calculation models associated with the momentum flux measurement technique are presented first. Then, the volumetric injection rates are estimated based on the momentum flux data and the calculation models and compared with those measured by a volumetric flow rate meter. The results showed that the momentum flux measurement can detect the injection start and end timings and the transient and steady regimes of the fuel injection. However, the estimated volumetric injection rates showed a large difference from the measured injection rates. An alternative method is suggested that corrects the estimated injection rate results based on the measured mean volumetric flow rates.

기호설명

P : 운동량, kg·m/s
 Q : 체적유량, L/min
 \dot{m} : 질량유량, kg/s
 ρ : 밀도, Kg/m³
 V : 속도, m/s

F : 힘, N
 A : 분사 면적, m²
 R : 기체상수, J/mol·K
 T : 실온, °C
 P_{amb} : 배압, bar
 γ : 비열비
 M : 마하수

(Received: 7 Sep 2022, Received in revised form: 19 Sep 2022, Accepted: 21 Sep 2022)

*인하대학교 기계공학과

[†]책임저자, 인하대학교

E-mail: ss.moon@inha.ac.kr

TEL: (032)860-7378 FAX : (032)868-1716

1. 서론

전 세계적인 탄소중립 추세에 따라, 수소, 암모니아 등 에너지 변환 과정에서 탄소 배출이 없는 무탄소 연

료로의 전환이 가속화되고 있다. 특히 수송 분야에 있어 수소를 연소하는 수소 내연기관은 국내외에서 미래 동력원으로 새롭게 각광받고 있다⁽¹⁾. 배터리전기차 및 연료전지차와 다르게 수소 내연기관은 오랜 기간 축적된 기존 내연기관 관련 기술들을 활용할 수 있다는 이점을 갖고 있기 때문이다. 이에 따라 기존 가솔린 또는 디젤 엔진을 수소연료로 대체하여 출력과 효율을 평가하는 연구가 최근 이루어지고 있다⁽²⁾. 그러나 수소는 밀도, 점성 등 물성치 뿐만 아니라 점화에너지와 연소속도 등 연소특성에 있어서도 기존 내연기관에 사용된 탄화수소 연료와 큰 차이점이 있다. 내연기관 연료로서 수소는 높은 발열량에도 불구하고 부피당 에너지 밀도가 낮으며, 낮은 점화에너지와 빠른 연소속도의 특성을 가진다⁽³⁾. 이로 인해 흡기 포트분사식 엔진에 적용될 경우 수소연료가 공기흡기량을 제한하여 체적효율 하락이 수반되고, 조기점화 및 역화의 가능성이 있다. 따라서 최근 수소 내연기관은 체적효율 하락을 보상하고 이상 연소현상을 방지하기 위해 실린더 내에 수소를 직접 분사하여 점화하는 방식을 채택하고 있다.

연료 분사시기 및 기간, 분사유량 등의 분사조건은 직접분사식 엔진의 출력, 효율 그리고 배출가스에 영향을 미치는 주요한 인자이다. 수소 직접분사 엔진 또한 최적의 분사조건을 선정하기 위해 엔진 운전조건에 따른 연료의 분사 및 분무특성에 관한 연구가 요구되고 있다⁽⁴⁾. 연료분사특성을 파악하기 위한 대표적 연구 수단으로서 시간에 따른 분사유량의 변화를 측정하는 분사율 계측이 있다. 액상 연료에 대한 기존의 분사율 계측 기법로서 Zeuch법과 Bosch-tube법이 대표적으로 적용되어 왔다^(5,7). Zeuch법은 연료로 가득 찬 밀폐 용기에 연료를 분사할 때 상승하는 압력의 변화율을 이용하여 분사율을 측정하는 기법이며, Bosch-tube법은 연료로 가득 찬 장관 내에 연료를 분사할 때 생성된 압력파를 이용해 분사율을 측정하는 기법이다. 하지만 기상 연료에 이러한 계측기법을 적용할 경우 압축성 유동으로 인해 제어 체적에서의 압력 변화가 매우 적어 이를 측정하는데 어려움이 있다. 또한 밀폐 용기를 일정한 압력으로 유지하기 위한 제어와 관련 부품들의 기밀성 유지에도 많은 어려움이 있다.

인젝터 분사율을 측정하기 위한 또 다른 방법으로서 운동량 플럭스를 이용한 계측 기법을 들 수 있다^(8,9). 운동량 플럭스 계측 기법은 분사된 연료의 힘을 측정한 후, 이를 운동량 방정식에 기반한 분사율과 힘의 관계식에 대입하여 분사율을 산출하는 방식이다. 노즐 출구에

서 분사된 연료의 힘은 압전방식의 힘 센서를 사용하여 연료의 상에 상관없이 측정할 수 있고, 노즐 출구에 위치한 센서만으로 분사율을 계측할 수 있으므로 장치구성이 단순한 장점이 있다. 따라서 해당 방식은 기상 연료에 대해서도 분사율을 계측하기에 적합하다고 볼 수 있다.

운동량 플럭스 계측 기법은 액상 연료의 분사율 측정에 대한 적용성 검토가 이루어졌지만, 기상 연료에 대해서는 아직 적용 가능성이 충분히 검토되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 운동량 플럭스 계측 기법을 적용한 기상 연료의 분사율 계측 가능성을 검토해보고자 한다. 이를 위해 우선 분사율 계산 모델, 실험 장치구성, 실험 조건의 선정 등 계측 기법의 전반적인 방법론을 제시한다. 그 후 본 연구에서 제시한 기법으로 계측한 분사율 결과의 정확성을 체적유량계로 측정된 평균 체적유량 값과 비교하여 검토하고, 계측결과의 보정방법을 제시한다.

2. 계측 이론 및 실험

2.1 분사율 계산 모델

운동량 플럭스 계측 기법은 분사된 연료의 힘을 분사율로 변환하기 위한 계산 모델을 적용한다. 분사율 계산 모델은 운동량 방정식에 기반한 분사율과 힘의 관계식으로 도출된다. 식 (1)은 인젝터에서 분사되는 기상 연료에 대한 운동량 방정식을 나타낸다.

$$P = mV \quad (1)$$

기상 연료의 운동량 P 는 기상 연료의 질량 m 과 속도 V 의 곱으로 표현된다. 기상 연료의 질량 변화율을 유도하기 위해 식 (1)을 시간에 대해 전미분하면 시간에 대한 기상 연료의 질량 및 속도 변화율이 포함된 식 (2)가 유도된다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = F = \frac{dm}{dt}V + m\frac{dV}{dt} = \dot{m}V + m\frac{dV}{dt} \quad (2)$$

기상 연료가 분사되는 동안, 미소 시간변화에 따른 분사속도의 변화가 과도구간을 포함한 정상상태 구간에서 충분히 작다고 가정하면 $\frac{dV}{dt}$ 항을 소거할 수 있다. 따라서 인젝터에서 분사되는 연료의 힘은 해당 기체의 밀도 ρ , 체적유량 Q 그리고 속도 V 의 곱과 같다는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$F = \dot{m}V = \rho QV \quad (3)$$

본 연구에서는 기상 연료의 분사율을 체적분사율로 나타내고자 한다. 체적유량은 식 (4)로 표현되며, 이는 체적분사율을 기상 연료 제트(jet)의 힘으로 표현하기 위해 사용된다.

$$Q = AV \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 연립하여 기상 연료 제트의 힘과 체적분사율의 관계를 나타내는 체적분사율 계산 모델 식 (5)가 유도된다.

$$Q = \sqrt{\frac{AF}{\rho}} \quad (5)$$

여기서 A 는 힘센서에 충돌한 제트의 면적, F 는 힘센서로 측정된 제트의 힘, ρ 는 분사된 제트의 밀도이다. 식 (5)를 통해 체적분사율을 산출하기 위해서는 정확한 제트 힘 값의 대입과 더불어, 적절한 제트 면적 및 밀도 값을 대입해야 한다. 연료 분사 시 제트의 힘은 분무각이 존재하여 반경방향으로도 작용하나 편의상 수직방향 힘만을 고려하여 노즐 홀과 수평하게 설치된 힘센서에서 측정된 값을 제트의 힘으로 가정한다. 제트의 면적은 힘센서 충돌 시 면적으로 대입해야 하나 편의상 인젝터 노즐의 홀 단면적으로 가정하였다. 본 연구에서는 노즐 출구와 힘센서의 거리를 1 mm 정도로 충분히 짧게 적용한 바(2.3절의 실험조건 참조), 이러한 가정에 의한 오차요소는 크지 않다고 판단된다.

복잡한 내부구조를 가진 노즐 출구의 압축성 유동에 있어 제트의 밀도를 예측기는 어려운 바, 본 연구에서는 노즐 출구에서의 세 가지 유동특성을 가정하여 제트의 밀도를 계산하고, 이에 따른 체적분사율의 계산 결과를 체적유량계 측정값과 비교함으로써 각 가정의 타당성을 검토하였다.

제트 유동특성에 대한 첫 번째 가정은 분사된 제트의 온도, 압력이 주변 온도(T_{amb}), 압력(P_{amb})과 동일하다는 것이다. 액상 연료분사의 운동량 플럭스 측정에 관한 기존의 연구에서는 연료 분사압력이 모두 동압으로 전환되어 노즐 출구 연료의 정압은 주변 압력과 동일함을 논하였다⁽⁹⁾. 기상연료 역시 동일한 유동특성을 가지고 있고 이상기체 거동을 한다고 가정하면, 식 (6)을 통해 노즐 출구에서의 제트 밀도를 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad P = P_{amb} \quad (6)$$

여기서 R 은 기상 연료의 기체상수를 나타낸다.

두 번째로 인젝터 노즐이 수축 노즐이며, 분사압과 주변 압력의 압력 차에 의해 노즐 출구에 초크(choke) 유동이 발생한다는 가정을 도입하였다. 비열비(γ)가 1.4인 기체의 경우 분사압과 주변 압력의 차이가 2배 이상이면 노즐 홀에서 초크 현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서 적용한 고압분사(10 bar 이상) 조건을 고려하면 인젝터 노즐 출구에서의 초크 유동 형성을 가정할 수 있다. 초크 유동의 경우, 노즐 홀에서의 제트 유속은 마하 1로 고정되고 이 때의 밀도와 압력은 등엔트로피 유동에 대한 압력계산 식 (7)을 통해 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\rho = \frac{P_c}{RT}, \quad \frac{P_0}{P_c} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

여기서 P_c 는 초크 유동 시 제트압력, P_0 는 분사압력, M 은 마하수이며 1로 고정된다.

세 번째 가정은 인젝터 내부 구조가 수축-확대 노즐이며, 이에 따라 노즐 출구의 연료 제트가 초음속 유동이라는 것이다. 두 번째 가정의 유동조건에서 노즐 홀 직경보다 더 작은 직경을 갖는 유로가 인젝터 내부에 존재하면 수축-확대 노즐의 특성에 의한 초음속 유동이 노즐 출구에서 발생할 수 있다. 이 경우 마하수는 1 이상으로 증가하고, 정확한 마하수는 체적유량계를 통한 체적유량 값을 노즐 홀 단면적으로 나누어 계산할 수 있다. 초음속 유동으로 가정한 제트의 밀도와 압력은, 주어진 마하수 조건에 대하여 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다.

2.2 실험 장치

Figure 1은 힘센서를 이용한 기상 연료 분사율 측정장

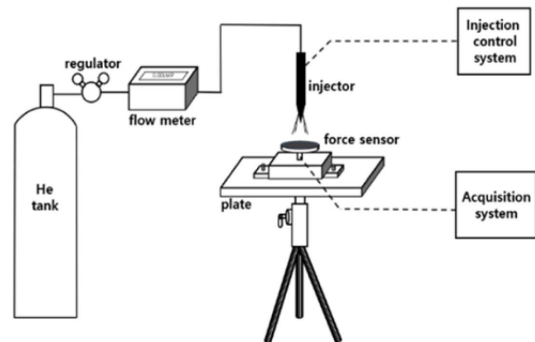


Fig. 1 Schematic diagram of the momentum flux measurement system

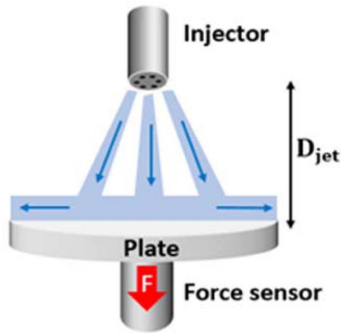


Fig. 2 Momentum flux measurement of the gas fuel jet

치의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 인젝터 연료분사 시스템과 힘센서 데이터 취득을 위한 힘센서 플레이트 및 삼각대 등으로 구성된다. 인젝터는 노즐 홀(hole) 직경이 0.15 mm인 6홀 가솔린 직접분사 인젝터를 사용하였으며, 기상 연료로는 수소와 물성치가 가장 비슷한 헬륨을 이용하였다. 분사압력은 최초 120 bar로 충전된 헬륨탱크 입구에 압력조절기(pressure regulator)를 장착하여 조절하였다.

Figure 2에 나타난 바와 같이, 인젝터에서 분사된 기상 연료의 힘을 측정하기 위해서 압전방식의 힘센서(Kistler社, 9217A1)를 사용하였다. 힘센서를 통해 측정된 전압값은 전하증폭기(Kistler社, Model 5018A)를 통해 증폭된 후, 오실로스코프(Tektronix社, TDS 2024B)를 통해 취득하였다. 분사 전류파형 및 기간 등의 분사조건은 솔레노이드 구동 드라이버(Zenobalti社, ZB 5013) 및 지연발생기(Stanford Research System社, DG 535)를 이용하여 조절하였다. 힘 센서 측정 결과 및 2.1절에 제시된 밀도 모델을 통해 계산된 체적분사율 결과의 신뢰성은 체적유량계(ALICAT社, WIZ-701)로 측정된 평균 체적유량과 비교하여 검토하였다. 해당 결과들의 구체적인 비교 방법에 대해서는 3.2 절에서 상세히 설명하도록 한다.

2.3 실험 조건

Table 1은 본 연구에서 적용한 실험 조건을 나타낸다. 다양한 분사압력에 대한 기상 연료의 분사율을 파악하고 분사율 측정결과와 체적유량계 측정결과와의 비교해석을 위해 5 bar에서 20 bar까지 5 bar 간격으로 분사 압력을 설정하였다. 분사 펄스 기간은 3000 rpm으로 작동하는 엔진에서 1 행정(크랭크각 기준 180도) 동안 연료가 분사되는 상황을 가정하여 10 ms로 설정하였다. 인

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Helium
Injection pressure [bar]	5, 10, 15, 20
Jet collision distance [mm]	1
Injection pulse duration [ms]	10
Cutoff frequency [kHz]	1
Ambient pressure [bar]	1
Ambient temperature [K]	298

젝터 노즐 출구와 힘센서 플레이트 사이의 거리인 제트 충돌거리는 노즐의 분사 각도에 의한 영향과 기상 연료의 초기 운동량 손실을 최소화하기 위해 1 mm로 고정하였다. 연료분사는 상온 및 대기압 주변 조건에서 수행되었다.

힘센서로 취득한 힘 데이터는 고주파의 노이즈 데이터가 포함되어 있다. 고주파 노이즈 데이터는 전하증폭기에 내장된 저역 통과 필터(Low-Pass Filter) 기능을 이용하여 적절한 차단 주파수(cutoff frequency) 설정을 통해 완화될 수 있다. Fig. 3은 전하증폭기에서 차단 주파수를 100 Hz, 600 Hz, 1 kHz, 2 kHz로 조정했을 때 취득되는 전압파형의 과도구간을 나타내고 있다. 차단 주파수가 2 kHz에서 1 kHz로 감소하면 분사율 과도구간의 경향이 유지되며 노이즈가 완화되지만, 차단 주파수가 1 kHz에서 600 Hz 이하로 감소하는 경우에는 분사율 과도구간의 경향이 유지되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 저역 통과 필터의 차단 주파수를 1 kHz로 고정하여 힘센서 데이터를 취득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 힘센서 측정 결과

Figure 4는 20 bar 분사압력 조건에 대한 인젝터 전류파형 및 힘센서 측정결과와 이를 분사율 계산식 (5)에 대입하여 계산한 체적분사율 결과를 나타낸다. 제시된 체적분사율은 제트 밀도에 대한 첫번째 가정(식 (6))을 이용하여 산출한 결과 예시를 나타낸 것이다.

결과를 통해, 분사는 분사 신호가 인가되고 0.15 ms 이후 시작되며, 제트 체적분사율의 과도적 구간은 전체 분사 기간의 약 30%를 차지함을 알 수 있다. 인젝터의

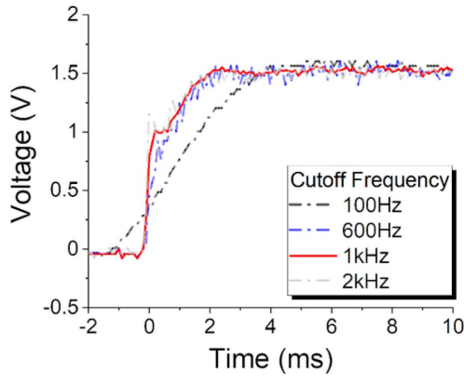


Fig. 3 Measured voltage waveforms by the force sensor with various cut-off frequencies of charge amplifier

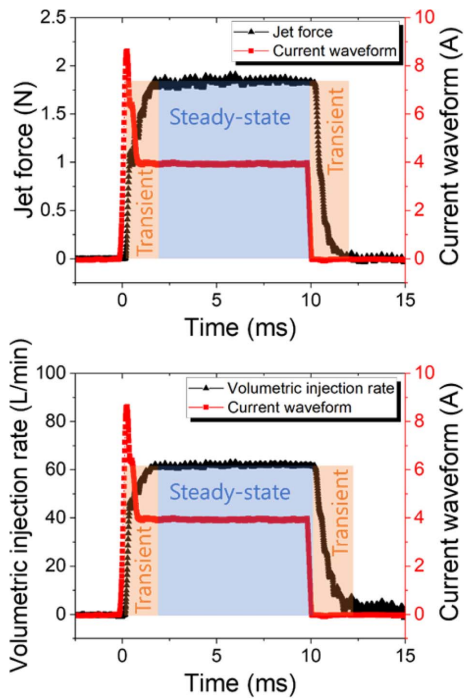


Fig. 4 Gas jet force measured by the force sensor (up) and the estimated volumetric injection rate (down)

실제 분사 기간은 약 11.6 ms로, 지연발생기를 통해 공급한 분사 펄스 기간 보다 16% 길게 나타났으며, 이는 전기자(armature), 니들, 스프링 등 분사율과 관련된 인젝터 내 부품거동의 지연 및 과도적 특성에 의한 것이라 판단된다.

위의 결과는 힘센서를 이용한 본 계측기법이 분사의 시작점 및 끝점, 과도 및 정상구간 등, 기상 연료 분사

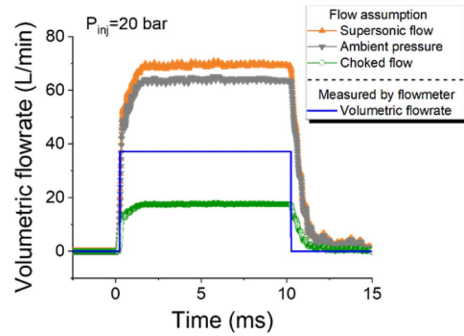


Fig. 5 Estimated injection rates based the momentum flux measurements and their comparison with the measurement results of the volumetric flow meter

의 과도적 특성을 탐지해 낼 수 있음을 나타낸다. 그러나 도출된 분사율 값 자체에 대한 신뢰성 검증이 필요하며, 이에 대한 논의는 다음 절에서 상세히 진행하고자 한다.

3.2 유동특성 가정에 따른 체적분사율 특성

유동특성에 대한 가정에 따라 식 (5)에 대입되는 밀도 값이 달라지기 때문에, 본 절에서는 먼저 유동특성 가정에 따라 달라지는 체적분사율을 나타내고, 이를 체적유량계로 측정된 결과와 비교하였다. Fig. 5는 노즐 출구 제트 밀도를 2.1절에 제시한 배압조건, 초크유동, 초음속유동으로 가정하여 얻어진 체적분사율과 체적유량계를 통해 얻어진 가상적인 분사율 파형(청색)을 나타내고 있다. 체적유량계에 의한 가상 분사율 파형을 얻기 위해 10 ms의 분사 펄스 기간을 적용하여 80 Hz의 고주파 분사를 수행하였다. 이 경우 체적유량계는 시간평균 체적유량을 분 당의 연료체적 값으로 나타내게 되는데, 이를 1분 동안의 분사횟수(4800)로 나눔으로써 1회 분사 당의 연료체적을 구하였다. 그 후 1회 분사의 연료체적이 10 ms 동안의 정상상태 분사에 의해 얻어진다고 가정하고 사각형태의 가상분사율 파형을 도출하였다.

결과를 통해, 유동특성의 세 가지 가정을 통해 도출된 분사율과 체적유량계로 측정된 분사율에는 큰 차이가 있으며, 세 가지 가정 모두 정확한 분사율을 예측할 수 없음을 알 수 있다. 이는 복잡한 내부구조를 가진 노즐 출구의 유동특성을 단순한 노즐형태를 가정한 기존의 이론모델로는 예측이 어려움을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 노즐 출구 제트 밀도의 예측모델을 이용하는 대신, 체적유량계의 측정 값을 기준으로 힘센서로 측정된 체적분사율을 보정하는 방법론을 대안

으로서 제시하고자 한다.

먼저 운동량 플럭스 계측 기법에 있어 노즐 출구에서의 제트 온도, 압력이 주변 온도, 압력과 동일하다는 가정 하에 체적분사율을 계산하였다. 보정 계수는 체적유량계와 운동량 플럭스 기법을 이용해 측정된 1회 분사당의 연료체적의 비($V_{flowmeter}/V_{momentum}$)로 정의하였으며, 이의 계산식을 식 (8)-(10)에 나타내었다.

$$Correction\ factor = \frac{V_{flowmeter}}{V_{momentum}} \quad (8)$$

$$V_{flowmeter} = \int_0^{0.01} Q_{flowmeter} dt \quad (9)$$

$$V_{momentum} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} Q_{force\ sensor} dt \quad (10)$$

여기서 t_{start} 와 t_{end} 는 분사율 파형을 통해서 파악한

실제 분사의 시작점 및 끝점을 나타낸다.

Figure 6은 각 분사압력 조건에 있어, 보정 계수를 적용하여 보정된 체적분사율 결과를 나타낸다. 분사압의 증가에 따라 과도적 구간의 특성에는 큰 차이가 없으나 정상상태 분사율은 대폭 증가함을 알 수 있다. 향후 이러한 보정기법을 이용함으로써 가스연료의 다양한 분사조건이 과도적 분사율에 미치는 영향을 정량적으로 해석할 수 있으리라 기대된다.

Figure 7은 분사압력에 따른 보정 계수의 변화를 나타낸다. 적용한 모든 분사압력 조건에서 0.4~0.6 범위의 보정계수가 나타났으며, 일반적으로 분사압력의 증가에 따라 보정계수가 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과가 가지는 물리적인 의미 및 배경을 특정하기는 어려운 바, 이 부분에 대해서는 향후 제트 유동특성 관점에서의 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

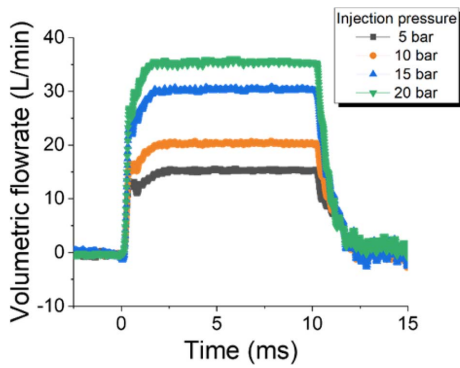


Fig. 6 Corrected volumetric injection rate with measured volumetric flowrate at each injection pressure conditions

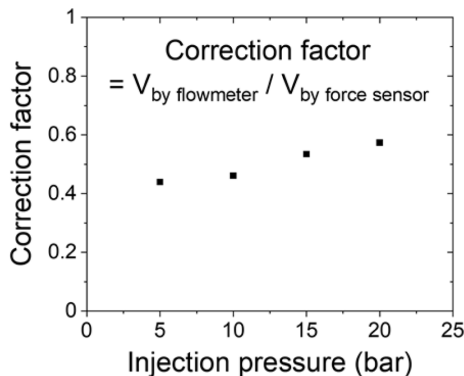


Fig. 7 Correction factor of injection quantity estimated by the momentum flow measurement against the measured injection quantity by the flow meter

4. 결 론

본 연구에서는 분사되는 제트의 힘을 측정하여 연료의 과도적 분사율을 도출하는 운동량 플럭스 기반 분사율 계측기법의 기상 연료에 대한 적용가능성을 검토하고 결과의 보정 방법론에 대하여 논의하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 운동량 플럭스 기법을 통해 기상 연료분사의 시작점 및 끝점, 과도 및 정상구간, 실제 분사시간을 명확히 파악할 수 있었다.
- (2) 힘 측정결과와 노즐 출구 유동특성에 대한 가정을 통해 산출된 체적분사율과 체적유량계로 측정된 체적유량을 비교 해석한 결과 상당한 오차가 존재하는 것을 확인하였다. 이는 적용 인젝터의 복잡한 노즐 내부 구조로 인해 노즐 출구의 제트 밀도를 일반적인 이론모델로 표현하기 힘들기 때문이라 판단된다.
- (3) 운동량 플럭스 기법을 통해 얻어진 체적분사율 결과를 체적유량계 측정결과를 이용하여 보정하는 방법론을 제시하였다. 적용된 분사압력 조건에서 0.4~0.6 범위의 보정 계수가 결정되었다. 이 보정계수에 대한 물리적 의미를 파악하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요함을 논의하였다.

향후 연구에서는 코리올리(Coriolis) 유량계 등의 질량 유량계를 이용하여 체적분사율이 아닌 과도적 질량분사율을 계측할 수 있는 기법을 제시할 계획이다. 더 나아가서는 체적유량계와 질량유량계를 동시에 적용하여 노

즐 출구의 제트 밀도를 실측하고, 그 결과를 바탕으로 노즐 출구 제트 밀도의 상관식을 도출함으로써 힘 센서 측정 결과만으로 과도적 분사율을 도출할 수 있는 새로운 방법론을 제시하고자 한다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 20018473).

참고문헌

- (1) A. Onorati, R. Payri, B. M. Vaglieco, A. K. Agarwal, C. Bae, G. Bruneaux, M. Canakci, M. Gavaises, M. Gunthner, C. Hasse, S. Kokjohn, S-C. Kong, Y. Moriyoshi, R. Novella, A. Pesyridis, R. Reitz, T. Ryan, R. Wagner and H. Zhao, "The role of hydrogen for future internal combustion engines", *Int. J. Engine Res.*, Vol. 23, No. 4, 2022, pp. 529~540.
- (2) L. Rouleau, F. Duffour, B. Walter, R. Kumar and L. Nowak, "Experimental and Numerical Investigation on Hydrogen Internal Combustion Engine", *SAE Tech. Pap.*, 2021, 2021-24-0060.
- (3) H. L. Yip, A. Srna, A. Chun, Y. Yuen, S. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell and Q. N. Chan, "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion", *Appl. Sci.*, Vol. 9, No. 22, 2019, pp. 1~30.
- (4) S. Lee, G. Kim and C. Bae, "Behavior of hydrogen hollow-cone spray depending on the ambient pressure", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 5, 2021, pp. 4538~4554.
- (5) W. Bosch, "The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", *SAE Tech. Pap.*, 1966, 1966-02-01.
- (6) A. Takamura, T. Ohta, S. Fukushima and T. Kamimoto, "A study on precise measurement of diesel fuel injection rate", *SAE Tech. Pap.*, 1992, 920630.
- (7) G. R. Bower and D. E. Foster, "A comparison of the bosch and zuech rate of injection meters", *SAE Tech. Pap.*, 1991, 910724.
- (8) J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador and J. Gimeno, "Measurements of spray momentum for the study of cavitation in diesel injection nozzles", *SAE Tech. Pap.*, 2003, 2003-01-0703.
- (9) R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno and L. D. Zapata, "Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions", *Fuel*, Vol. 87, No. 7, 2008, pp. 1165~1176.
- (10) F. M. White, *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2015.