

고압 인젝터의 분사율 예측을 위한 경량 모델 개발

이상권* · 배규한* · Omer Faruk Atac* · 문석수† · 강진석**

Development of a Lightweight Prediction Model of Fuel Injection Rates from High Pressure Fuel Injectors

Sanggwon Lee, Gyuhan Bae, OMER FARUK ATAC, Seoksu Moon and Jinsuk Kang

Key Words: Fuel injector(연료 인젝터), Injection rate(분사율), Needle motion(니들 거동), 1-D Modeling(1-D 모델링)

Abstract

To meet stringent emission regulations of automotive engines, fuel injection control techniques have advanced based on reliable and fast computing prediction models. This study aims to develop a reliable lightweight prediction model of fuel injection rates using a small number of input parameters and based on simple fluid dynamic theories. The prediction model uses the geometry of the injector nozzle, needle motion data, injection conditions and the fuel properties. A commercial diesel injector and US No. 2 diesel were used as the test injector and fuel, respectively. The needle motion data were measured using X-ray phase-contrast imaging technique under various fuel injection pressures and injection pulse durations. The actual injector rate profiles were measured using an injection rate meter for the validation of the model prediction results. In the case of long injection durations with the steady-state operation, the model prediction results showed over 99 % consistency with the measurement results. However, in the case of short injection cases with the transient operation, the prediction model overestimated the injection rate that needs to be further improved.

기호설명

A : 면적, m^2
 t : 시간, ms
 C_d : 유량계수
 ρ : 밀도, kg/m^3
 μ : 점도, $kg/m\cdot s$
 E : 체적탄성율, MPa
 U : 유속, m/s

\dot{m} : 질량유량, kg/s
 P : 분사압, MPa

1. 서론

내연기관 차량의 친환경 기조에 따라, 엔진의 열효율 증대 및 배기 저감을 위한 다양한 기술개발이 이루어지고 있으며, 연료 분사는 이를 이루어 내기 위한 핵심 기술 요소라 할 수 있다. 현재 차량에 탑재되는 인젝터의 연료 분사는 피드백 방식을 통해 제어되고 있다. 엔진 조건에 대응하는 연료 분사가 이루어진 후, 산소 센서 등의 배기 측 후단 센서를 통해 요구 부하에 맞는 분사가 이루어졌는지 측정하고 여러 사이클에 걸쳐 분사량의 조절이 이루어진다. 그러나 실주행 상황에서는 운전자가 요구하는 부하 조건이 불규칙적이고 빠르게 변화

(Received: 2 Sep 2020, Received in revised form: 14 Oct 2020, Accepted: 15 Oct 2020)

*인하대학교 대학원 기계공학과

**현대자동차

†책임저자, 인하대학교

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

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

기 때문에 피드백 제어가 정밀하게 이루어지기 어려운 측면이 있으며, 이는 유해 물질 배출의 주 요인이 될 수 있다. 따라서 실주행 및 변동 부하 조건에서 분사량 제어의 오차를 줄이기 위한 방편으로서 입력부하에 선제적, 즉각적으로 대응할 수 있는 고응답 분사율 예측 수단의 필요성이 대두되고 있다.

한편 최근에는 가상엔진 모델을 이용한 엔진 개발이 폭 넓게 이루어지고 있다. 가상엔진 모델은 엔진의 구성요소들을 각각의 서브 모델(sub-model)로 표현하고 이들을 연동하여 해석함으로써 다양한 엔진의 제원 및 구동 조건에 따른 엔진 출력 및 배기 특성을 빠르게 모사해 낼 수 있는 특징을 가진다. 이는 엔진 개발의 효율성을 증대시키고 최적 운전조건을 빠르게 도출해 낼 수 있는 수단으로서 각광받고 있다. 이 때, 각 서브 모델들은 기본적으로 정확하면서도 신속한 모사의 진행이 가능해야만 가상엔진 시뮬레이터의 이점을 충분히 살릴 수 있다. 따라서 가상 엔진 시뮬레이터에 적용할 수 있는 정확하면서도 신속한 연산이 가능한 분사율 예측 모델의 필요성이 대두되고 있다.

기존의 분사율 예측은 대부분 AMESim과 같은 상용 소프트웨어를 기반으로 이루어졌다⁽¹⁾. 이는 인젝터 내부 부품의 전기적 특성 및 물리적 거동을 각 구성요소별로 모델링 함으로써 입력변수가 매우 많아 모델의 튜닝 및 연산에 많은 시간이 소요되었다. 또한, 튜닝된 모델의 인젝터 간 호환성을 확보하는데도 어려움이 있었으며, 인젝터 내부 다양한 구성요소들의 정보를 모두 알아야만 하는 어려움이 있었다. 이러한 상용 소프트웨어 기반 모델의 경량성 및 범용성 부족은 엔진 제어 및 가상엔진 모델에 적용이 어렵다는 한계점으로 다가왔다.

이러한 배경을 바탕으로, 본 연구에서는 간단한 유체 역학 기반의 이론을 바탕으로 노즐 내부 형상, 연료 물성, 분사 조건 등의 간단한 입력 변수만을 이용하여 정확하고 빠른 분사율 예측이 가능한 1-D 경량모델을 제안하고자 한다. 구축된 모델의 범용성과 기동성을 바탕으로, 엔진의 요구 출력에 대응하는 정밀한 연료 분사 제어를 가능하게 하는 새로운 방법론의 구축에 기여하는 것을 연구의 목표로 삼는다.

2. 분사율 예측 모델

모델의 입력변수로서 분사 압력, 연소실 압력, 분사기 간과 같은 분사 조건과 밀도, 체적탄성율(bulk modulus)

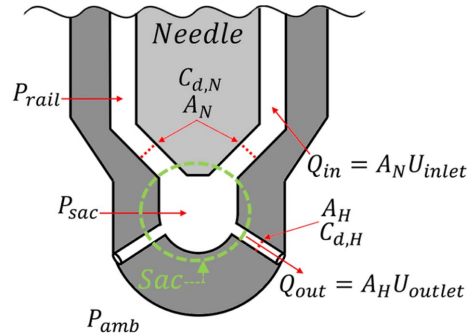


Fig. 1 Schematic diagram of the nozzle

과 같은 연료 물성이 필요하다. 또한, 인젝터 노즐 내부의 형상 정보 및 분사 니들의 거동에 대한 정량 정보도 필요하다.

Fig. 1은 인젝터 노즐 내부의 구조를 간략하게 나타낸다. 본 모델은 연료 분사 과정 중 니들의 움직임에 의해 발생하는 노즐 내부 Sac 영역의 압력 변화를 계산해 내는 것이 핵심이다. 체적탄성율의 정의로부터, Sac압력의 변화량(DP)은 체적탄성율 E와 그 순간의 체적 V 및 체적 변화량 ΔV 에 대한 함수로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = E \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

분사 중 임의의 시점에서의 Sac 압력을 계산하기 위해서, 체적(V)에 대응하는 해당 시점의 Sac체적을 도출해야 한다. Sac영역의 체적은 Fig. 2의 노즐 내부 이미지에 나타난 ROI(region of interest)의 체적에서 니들의 부피를 제함으로써 구할 수 있다. ROI의 체적은 원뿔대(V_0), 원기둥(V_1), 반구(V_2)의 형상으로 단순화시켜 분리한 후, 식 (2)-(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$V_1 = \pi h_{in} R_0^2 \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{2\pi}{3} R_1^3 \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{\pi}{3} (R_0^2 + R_0 R_1 + R_1^2) \quad (4)$$

니들의 위쪽 반경(R_2)은 니들 리프트(needle lift, L)의 함수인 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 체적 V_3 은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_2(L) = R_0 - L \tan \alpha \quad (5)$$

$$V_3(L) = \frac{\pi}{3} (R_0^2 + R_0 R_2 + R_2(L)^2) \quad (6)$$

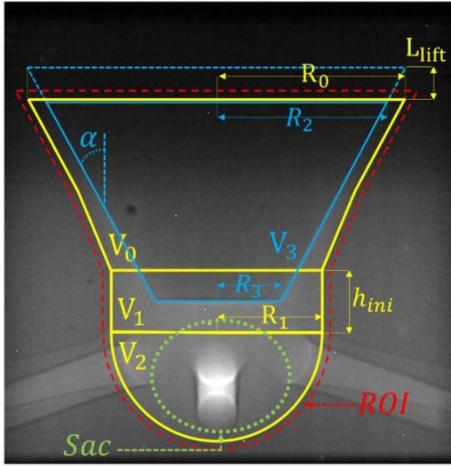


Fig. 2 Geometrical factors of the nozzle

위 식을 종합하여 Sac 영역의 체적에 해당하는 V 를 식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

$$V = V(L) = (V_2 + V_1 + V_0) - V_3(L) \quad (7)$$

결과적으로 V 는 L 에 대한 식으로 나타낼 수 있으며, L 은 3장에서 설명될 X선 위상차 가시화 기법(XPCI; X-ray phase-contrast imaging)을 통해 측정하였다.

분사가 진행될 때의 체적변화량(ΔV)은 니들이 열리고 니들 상부 연료 레일(common rail)에서 유입되는 유량(Q_{in})과 노즐 오리피스로 빠져나가는 유량(Q_{out})의 차이를 통해 도출할 수 있으며, 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\Delta V = Q_{in} - Q_{out} \quad (8)$$

유량 Q_{in} , Q_{out} 은 베르누이 관계식에 기반한 이론 속도, 니들 시트(Needle seat) 및 오리피스의 유출입 단면적(A_N , A_H), 니들 시트 및 오리피스의 유량계수 ($C_{d,N}$, $C_{d,H}$)를 이용하여 식 (9) 및 (10)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 n_H 는 노즐의 흡수, α 는 니들의 경사각을 나타낸다(Fig. 2 참조). 이때 유입 단면적 A_N 은 식 (11)과 같이 L 의 함수로 표현할 수 있으므로, Q_{in} 또한 L 에 대한 함수로 표현된다.

$$Q_{in} = A_N U_{in} = A_N C_{d,N} \sqrt{\frac{2(P_{rail} - P_{sac})}{\rho}} \quad (9)$$

$$Q_{out} = n_H A_H U_{out} = n_H A_H C_{d,H} \sqrt{\frac{2(P_{sac} - P_{amb})}{\rho}} \quad (10)$$

$$A_N(L) = \pi L \sin \alpha (2R_0 - L \sin 2\alpha) \quad (11)$$

식 (9)의 $C_{d,N}$ 은 유사한 인젝터를 이용하여 측정한 정상상태 계측 값인 0.67로 고정하여 적용하였다⁽³⁾. 식 (10)의 $C_{d,H}$ 는 해당 인젝터의 고유 HFR (hydraulic flow rate) 값을 이론 유량으로 나누어서 얻은 값 0.88을 적용하였다.

3. 니들 거동의 계측

3.1 X선 위상차 가시화 기법

실시간으로 변하는 Sac 영역의 체적을 도출하기 위해 L 의 시간 변화에 대한 데이터가 필요하다. 니들 거동을 정량화하는 방법에는 니들 리프트 센서를 이용한 계측, AMESim 등의 상용 소프트웨어를 이용한 니들 거동 예측 등 다양한 방법을 생각해볼 수 있으나, 본 연구에서는 XPCI 기법을 이용하여 니들 거동을 해석하였다.

레이저와 같은 일반적인 광원과는 다르게, 초단파장 및 고에너지를 가진 X선은 노즐과 같은 금속 물질 및 고밀도 유동을 과도한 흡수 및 산란 없이 투과할 수 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 이러한 X선을 이용하여 노즐 내부 니들의 거동을 가시화할 수 있으며 취득된 이미지를 해석하여 니들 거동의 정량적 데이터를 얻을 수 있다.

3.2 실험 장치 개요

본 연구에서는 미국 APS (Advanced Photon Source)의 제3세대 싱크로트론(Synchrotron) X선을 이용해 노즐 내부 니들 거동의 가시화를 진행하였다.

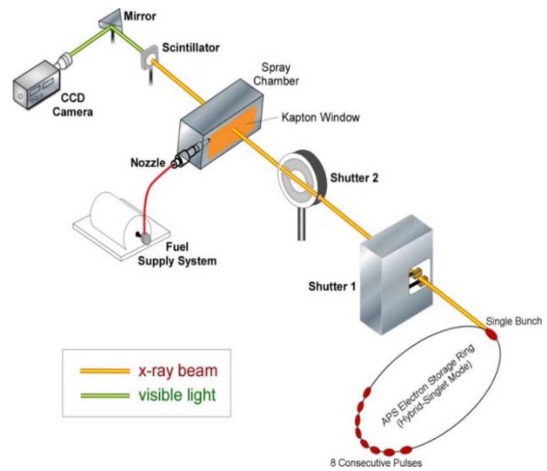


Fig. 3 Schematic diagram of XPCI setup

Fig. 3은 XPCI 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 이미징 시점에서 셔터를 통과한 X선은 노즐내부를 통과하게 되고, 그 후 간섭 메커니즘에 의해 노즐 내부의 위상차 이미지를 형성한다^(4,6). 이는 형광체(scintillator crystal)에 의하여 532 nm의 가시광 이미지로 변환되고 반사경을 통과하여 고속카메라에 수집된다. 67,890 fps (frame per second)의 촬영 속도로 가시화가 이루어졌으며, 이때 적용된 고속카메라의 가시화 영역은 512×512 pixel, 이미지의 해상도는 2.564 μm/pixel, 카메라의 노출 시간은 1 ms이다.

3.3 X선 이미지를 이용한 니들 거동 정량화

Fig. 4는 XPCI 기법을 통해 촬영한 인젝터 내부 니들 거동을 해석하는 과정을 개략적으로 보여주고 있다. 우선 Matlab 이미지 해석 프로그램을 이용하여 분사 개시 전 X선 이미지의 특정 영역에 기준 ROI를 설정한다. 그 후 분사 중 임의의 시점에서의 노즐 이미지에 기준 ROI와 같은 크기의 ROI를 설정하고, 이 ROI의 위치를 변경하면서 기준 ROI와의 상관계수를 계산한다. 상관계수가 가장 높은 ROI의 위치를 탐지하고, 이를 통해 분사 중 임의의 시점에서 기준 ROI의 위치에 대한 니들의 변위량을 정량화한다.

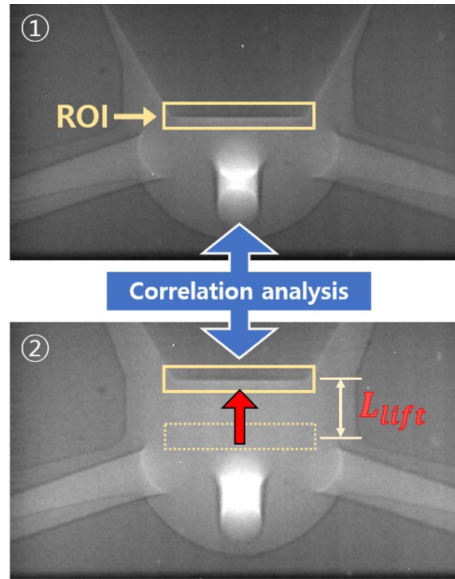


Fig. 4 Correlation analysis of transient needle motion and derivation of the needle lift

MPa의 분사시간 1.0 ms 조건에서의 니들 거동을 분석하여 나타낸다. 결과를 통해 니들의 과도적 거동은 크게 1차 상승(1st rising), 2차 상승(2nd rising), 1차 하강(1st

Fig. 5(a)-(c)는 각각 분사 압력 40 MPa, 100 MPa, 200

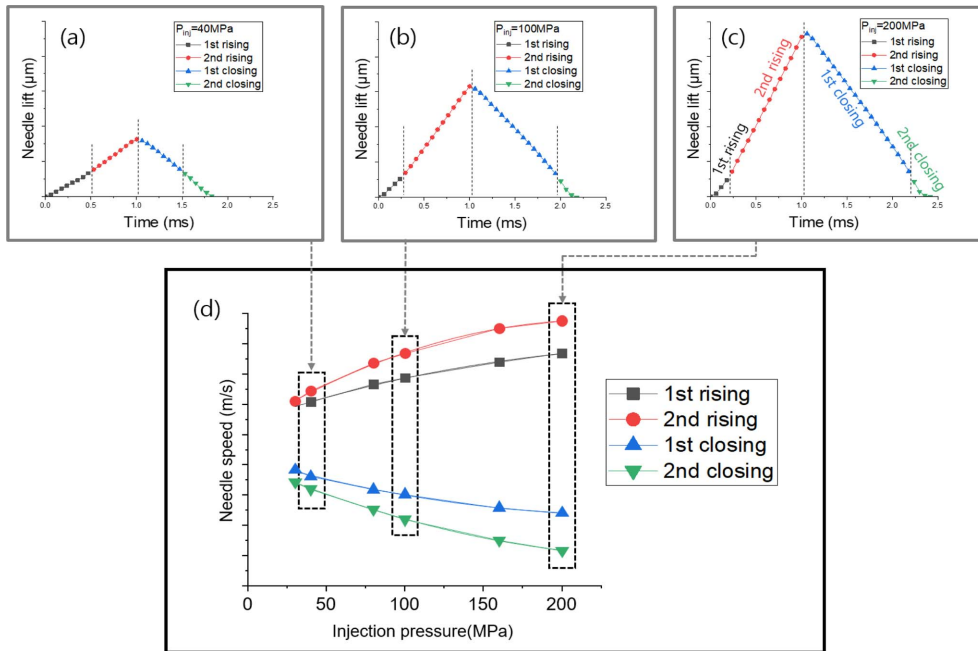


Fig. 5 Needle lift profiles and needle speeds in various injection pressure conditions

Table 1 Experimental conditions

Injector	8-Hole Diesel injector
Fuel	US No.2 Diesel
Fuel Temperature	298 K
Ambient density (ρ_a)	1.25 kg/m ³
Ambient gas temperature	298 K
Injection pressure (P_{rail})	30 MPa, 40 MPa, 100 MPa, 160 MPa, 200 MPa
Injection duration	0.15 ms, 0.45 ms, 1.0 ms

closing), 2차 하강(2nd closing)의 네 구간으로 나누어짐을 알 수 있다. 1차 상승 및 2차 하강은 분사 개시 및 종료 직전의 과도적 구간이며, 2차 상승 및 1차 하강은 니들이 선형적으로 거동하는 안정화 구간이다.

30~200 MPa에 해당하는 여러 분사 압력에 대하여 각각의 구간에서의 니들 속도를 산출한 후, 이를 분사 압력에 대한 니들 속도의 그래프로 정리하여 Fig. 5(d)에 나타내었다. 이를 함수의 형태로 정리하여 예측 모델에 입력함으로써 다양한 분사 압력 및 분사기간 조건에서

의 과도적 분사율 해석이 가능해졌다.

3.4 실험 조건

본 연구에서는 디젤 차량용 솔레노이드(Solenoid)구동 방식의 인젝터가 사용되었다. Table 1은 실험 조건을 정리하여 나타내고 있다. 적용 연료로서 US No.2 디젤을 사용하였으며, 분사 압력은 30 MPa부터 200 MPa의 범위를, 분사기간은 0.15 ms부터 1.0 ms의 범위를 적용하였다. 또한, 연료 분사가 이루어지는 분사 챔버(Chamber)는 질소(N₂) 가스로 충전 되었으며, 대기압 조건에서 XPCI 가시화를 진행하였다. 적용된 연료 및 챔버 내 질소가스의 온도는 298 K로 유지된 상태에서 실험을 수행하였다.

4. 예측 결과 및 검증

4.1 분사율 예측 결과 및 검증

2장에서 구축한 모델을 Matlab 소프트웨어에 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다. 0.15 ms의 짧은 분사기간부터 1.0 ms의 긴 분사기간, 30 MPa부터 200 MPa에 이

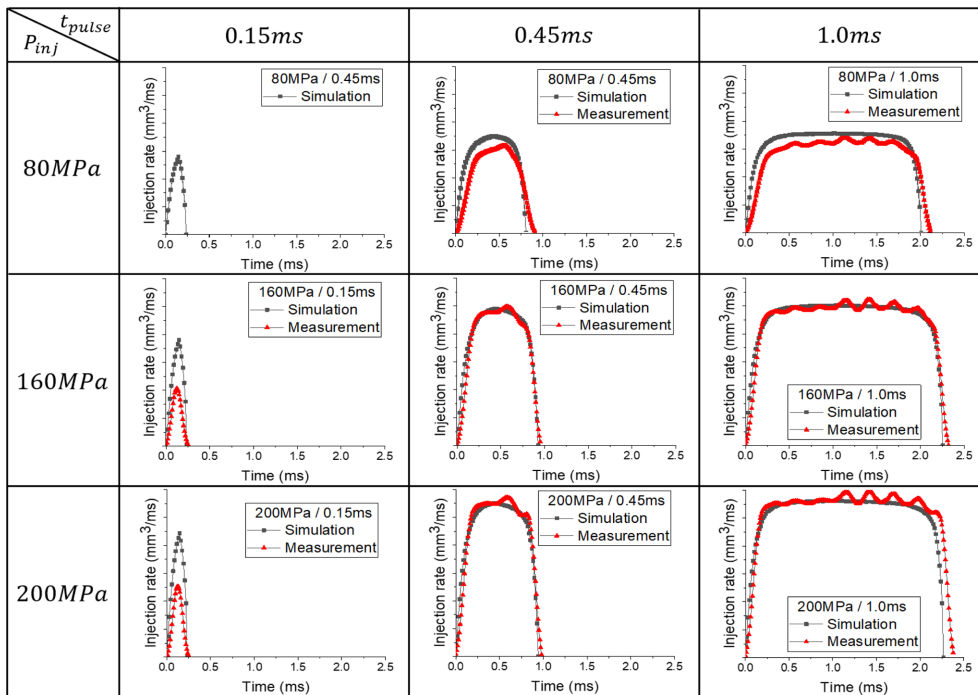


Fig. 6 Predicted injection rate profiles and their comparison to measurement results

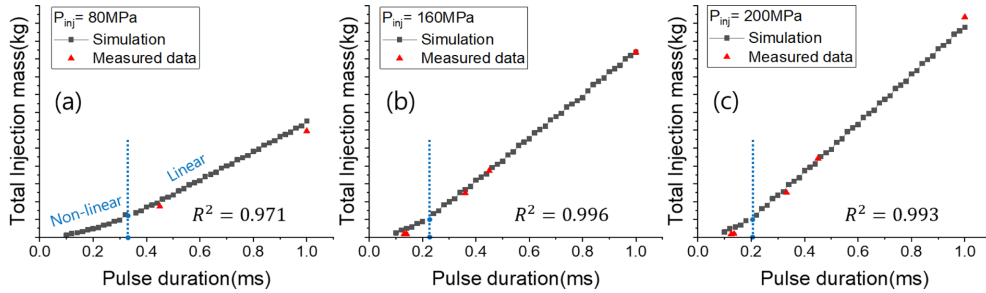


Fig. 7 Predicted total injection masses and their comparison to measurement results

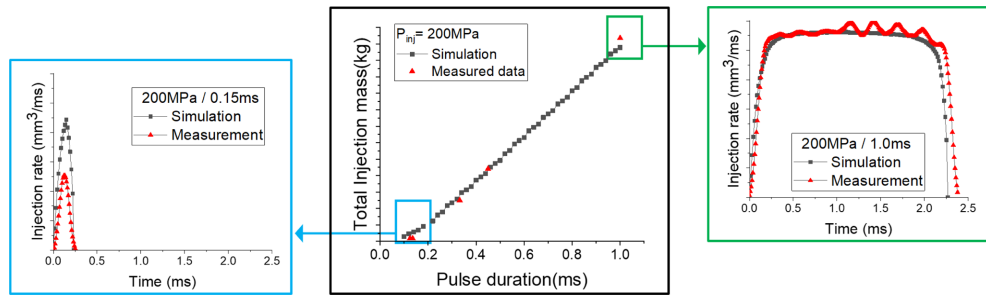


Fig. 8 Accuracy comparison of injection rate prediction results in ultra-short and long injection pulse durations

르는 넓은 분사압 조건에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 모델의 예측 결과를 Zeuch 타입의 분사율계를 이용해 측정된 실제 분사율 데이터와 비교하였으며⁽⁷⁾, 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 분사기간에 따른 예측 모델의 분사율 재현성을 살펴보면, 분사기간 1.0 ms의 긴 분사조건과 0.45 ms의 중간 길이 분사조건에서는 실제 측정 분사율과 시뮬레이션 결과 사이에 높은 유사성이 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 분사기간이 짧아질수록 시뮬레이션의 분사율 예측 결과가 실제 분사율을 과다하게 예측하는 경향이 나타나고 있다.

4.2 총 분사량 예측 결과 및 검증

각 연료 분사에서 대한 총 분사량은 분사율 그래프를 시간에 대해 적분함으로써 도출할 수 있다. 모델을 통해 예측된 분사율 데이터를 적분하여 얻어진 총 분사량(검은색)을 실제 총 분사량(빨간색)과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 분사기간을 자유로이 조절할 수 있는 시뮬레이션의 이점을 활용해, 0.1 ms부터 1.0 ms에 이르는 분사기간 조건에 대해 0.02 ms의 간격으로 시뮬레이션을 실시하였다.

Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, 짧은 분사기간 영역에서는 분사기간이 증가함에 따라 총 분사량이 비선형적

증가를 보이나, 임계분사기간(파란색 점선 지점) 이후로는 선형적 증가로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 임계분사기간 이후에 분사기간의 증가에 따라 분사량이 선형적으로 증가하는 것은 임계분사기간 이후에는 분사율이 정상상태에 도달한 상황(Fig. 6의 일정한 분사율 영역)에서 분사가 이루어지고 있음을 의미한다.

분사율 예측 결과와 동일하게 임계분사기간 이상의 긴 분사기간에서는 분사량 예측 결과가 결정계수(R^2) 기준 0.99 이상의 높은 정확도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 짧은 분사 조건 경우에는 상대오차가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이의 원인에 대해서는 5장에서 상세히 고찰하도록 한다.

5. 고 찰

분사기간에 따른 분사율 예측 모델의 정확도를 비교하여 Fig. 8에 나타냈다. 결과를 통해 임계분사기간 이상의 긴 분사조건에서는 실제 데이터와 시뮬레이션 결과 사이에 높은 정확성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 짧은 분사 조건에서는 과다 예측이 발생하는 것을 재차 확인할 수 있다.

이와 같은 오차가 발생하는 원인으로서는 Sac 영역의 압력 발달에 영향을 미치는 유동 인자들을 고려해 볼 수 있다.

첫 번째로, 분사 초기 완전 발달(fully-developed)되지 않은 유동, 즉 니들 리프트가 매우 작은 과도 유동 단계에서 Sac에 유입되는 유동의 레이놀즈(Reynolds)수가 정상상태에 비해 매우 작은 것을 생각해 볼 수 있다. 기존의 연구에 따르면, 임계치 이하의 레이놀즈수 영역에서 유량계수가 급격히 감소하게 되는데⁽¹⁾, 과도 유동 단계에서의 레이놀즈수가 임계치보다 작을 가능성이 있다. 예측 모델의 해석에서는 임계 레이놀즈수 이상의 정상상태에서의 유량계수를 이용한다, 이는 과도 단계에서의 분사율을 과대평가할 수 있다.

두 번째 인자로 체적탄성율의 값에 의한 오차를 생각해 볼 수 있다. 본 모델에서는 고정된 체적탄성율 값을 적용하였다($E=2000$ MPa). 그러나 체적탄성율은 연료에 가해지는 압력의 변화에 따라 변동하는 물리량으로서⁽⁸⁾, 과도 유동 단계에서의 체적탄성율은 모델해석에 적용한 값보다 작을 수 있다.

따라서 소유량 분사조건 또는 과도 유동 단계에서 분사율 예측의 정확도를 개선을 위해서는, 레이놀즈수에 따른 유량계수의 변동 및 연료 압력에 따른 체적탄성율의 변화를 고려한 모델의 개선이 요구되며, 향후 이에 관한 연구를 진행할 예정이다.

6. 결 론

본 연구에서는 연료 인젝터의 노즐 형상, 분사 조건, 연료 물성 등의 입력변수 및 간단한 유체역학 이론을 기반으로 하는 경량화된 1-D 분사율 예측 모델을 제안하였다.

구축된 모델을 이용하여 30 MPa부터 200 MPa까지의 분사압 조건, 분사시간 0.15 ms의 미소량 분사부터 1.0 ms의 긴 분사 조건에 대한 분사율 예측이 수행되었으며 그 결과를 분사율계를 이용한 실측 결과를 이용하여 비교 검증하였다.

결과를 통해, 분사시간이 상대적으로 긴 정상상태 분사조건에서는 예측 모델이 상관계수 기준 99% 이상의 분사량 예측 정확도를 나타냄을 확인하였다. 그러나 짧은 분사 조건에서는 예측 모델이 분사율 및 분사량을 과대평가하는 것을 확인하였다. 이러한 오차는 예측 모델이 층류, 난류 전환에 따른 레이놀즈 수 및 유량계수

의 변화, 연료압력에 따른 체적탄성율의 변화를 제대로 반영하지 못했기 때문이라 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시한 분사율 예측 모델은 향후 변동 유량계수 및 체적탄성율 모델의 도입을 통한 개선의 여지가 남아있다.

본 분사율 예측 모델은 입력변수가 적고 형상 정보를 자유롭게 수정할 수 있어 다양한 인젝터에 대해 유동적 적용이 가능하다. 또한, 물성 변경을 통해 바이오 디젤 등 다른 연료를 사용하는 인젝터에도 손쉽게 적용할 수 있는 범용성을 갖추고 있으며 1-D 모델로서 매우 짧은 연산 시간을 가지고 있다. 이러한 특성을 바탕으로 향후 차량의 엔진제어 또는 가상엔진 시뮬레이터의 서브 모델로서 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2020R1A2C1009884)

참고문헌

- (1) J. Kim, J. Lee and K. Kim, "Numerical study on the effects of fuel viscosity and density on the injection rate performance of a solenoid diesel injector based on AMESim", *Fuel*, Vol. 256, 2019, p. 115912.
- (2) F. J. Salvador, A. H. Plazas and J. Gimeno, "Complete modelling of a piezo actuator last-generation injector for diesel injection systems", Vol. 15, No. 1, 2015, pp. 3~19.
- (3) S. Yokobe, T. Oda, K. Ohsawa, T. Sumi, S. Sugata and K. Yabuta, "Spray Characteristics and Inside Flow of a Marine Diesel Injector", *SAE Tech. Pap.*, 2015, 2015-01-0838.
- (4) J. P. Viera *et al.*, "Linking instantaneous rate of injection to X-ray needle lift measurements for a direct-acting piezoelectric injector", *Energy Convers. Manag.*, Vol. 112, 2016, pp. 350~358.
- (5) W. Huang, S. Moon, Y. Gao, Z. Li and J. Wang, "Eccentric needle motion effect on near-nozzle dynamics of diesel spray", *Fuel*, Vol. 206, 2017, pp. 409~419.
- (6) W. Huang, S. Moon and K. Ohsawa, "Near-nozzle dynamics of diesel spray under varied needle lifts and its prediction using analytical model", *Fuel*, Vol. 180,

- 2016, pp. 292~300.
- (7) L. Postrioti, G. Buitoni, F. C. Pesce and C. Ciaravino, "Zeuch method-based injection rate analysis of a common-rail system operated with advanced injection strategies", *Fuel*, Vol. 128, 2014, pp. 188~198.
- (8) B. D. Nikolic, B. KEGL, S. D. Markovic, M. S. Mitrovic, "Determining the Speed of Sound, Density and Bulk Modulus of Rapeseed Oil, Biodiesel, and Diesel Fuel", *Thermal Science*, Vol. 16, 2012, pp. S569~S579.