

## 디젤 인젝터 분사율 예측을 위한 AMESim 기반 1-D 모델 구축

이진우\*<sup>†</sup> · 김재현\*\* · 김기현\*\*\* · 문석수\*\*\*\* · 강진석\*\* · 한상욱\*\*\*\*\*

### 1-D Model to Estimate Injection Rate for Diesel Injector using AMESim

Jinwoo Lee, Jaeheun Kim, Kihyun Kim, Seoksu Moon, Jinsuk Kang, and Sangwook Han

**Key Words:** Diesel solenoid type injector(디젤 솔레노이드 타입 인젝터), Injection rate(분사율), AMESim(아메시), Model parameter tuning(모델 파라미터 튜닝), Orifice discharge coefficient(오리피스 유량계수), Needle motion(니들 거동)

#### Abstract

Recently, 1-D model-based engine development using virtual engine system is getting more attention than experimental-based engine development due to the advantages in time and cost. Injection rate profile is the one of the main parameters that determine the start and end of combustion. Therefore, it is essential to set up a sophisticated model to accurately predict the injection rate as starting point of virtual engine system. In this research, procedure of 1-D model setup based on AMESim is introduced to predict the dynamic behavior and injection rate of diesel injector. As a first step, detailed 3D cross-sectional drawing of the injector was achieved, which can be done with help of precision measurement system. Then an approximate AMESim model was provided based on the 3D drawing, which is composed of three part such as solenoid part, control chamber part and needle and nozzle orifice part. However, validation results in terms of total injection quantity showed some errors over the acceptable level. Therefore, experimental work including needle movement visualization, solenoid part analysis and flow characteristics of injector part was performed together to provide more accuracy of 1-D model. Finally, 1-D model with the accuracy of less than 10% of error compared with experimental result in terms of injection quantity and injection rate shape under normal temperature and single injection condition was established. Further work considering fuel temperature and multiple injection will be performed.

#### 1. 서 론

최근 자동차 분야에서 전동화에 대한 대내외적 요구

가 거세지면서, 내연기관의 미래에 대한 부정적인 인식이 증가하고 있다. 하지만, 다수의 전문가 집단에서는 2030년 이후에도 여전히 내연기관을 사용하는 자동차의 비율이 80% 이상 차지하여 장기적으로 파워트레인의 주력이 될 것으로 예상하고 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 지속적으로 강화되고 있는 연비 및 배출가스 규제 대응을 위한 디젤 엔진 내 효율 향상을 위한 연구가 여전히 유효한 상황이다. 이에 최근에는 개발 기간 및 비용 절감을 위해 모델 기반의 가상엔진을 구축을 통한 연구가 주목을 받고 있다<sup>(2,3)</sup>. 디젤 연소의 시작과 효율을 결정하는 여러 인자 중 분사율은 연료 공급 관점에서 그 출발점이 되는 중요한 변수이다. 따라서 가상 엔진 개발 시, 분사율

(Received: 17 Feb 2020, Received in revised form: 5 Mar 2020, Accepted: 6 Mar 2020)

\*울산과학기술대학교 기계공학부

\*\*현대자동차 남양연구소

\*\*\*신라대학교 융합기계공학부

\*\*\*\*인하대학교 기계공학과

\*\*\*\*\*한국자동차연구원 제조기술연구센터

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 울산과학기술대학교 기계공학부

E-mail : jwlee2@uc.ac.kr

TEL : (052)279-3129

을 정확하게 예측할 수 있는 모델을 구축하는 것은 필수적이라고 할 수 있다. 통상 가솔린엔진은 계산 시간 등의 장점으로 인해 1-D 모델을 활용하고 있으며, 분사율 예측의 경우 AMESim, GT-Suite 등의 상용 프로그램을 기반으로 작성하고 있는 추세이다<sup>(4)</sup>. 하지만 기존의 연구는 주로 인젝터 입력 변수 변경에 따른 분사율 변화 특성 및 내부 거동 분석에 초점을 두고 있으나, 실제 분사율과의 정확도 향상 관점에서 모델 구축에 관한 연구는 널리 알려져 있지 못한 상황이다<sup>(5,6)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 AMESim를 활용한 디젤 인젝터의 1-D 모델을 구축하는 단계와 모델의 정확도를 향상하기 위해 필요한 실험 관점 항목에 대해 논의하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1 분사율 측정 장치

구축한 모델의 수준을 확인위한 실험결과를 취득하기 위해 아래 Fig. 1과 같은 보쉬 튜브법(Bosch tube method)를 이용한 분사율 측정장치를 구축하였다. 연료의 분사에 의한 튜브 내 압력 변동 해석을 위해 압전 방식의 압력 센서(Type 6052C, Kistler)를 분사율 계에 장착하였다. 전하증폭기(charge amplifier, Kistler 5011)을 이용하여 압력센서에서 측정된 전하 신호를 증폭하고 이를 오실로스코프 통해 PC로 취득하였다. 실험 조건 별 100회의 분사율을 측정하여 평균한 분사율 데이터를 이용하여 비교분석을 수행하였다. 또한, 모델 개선을 위한 추가

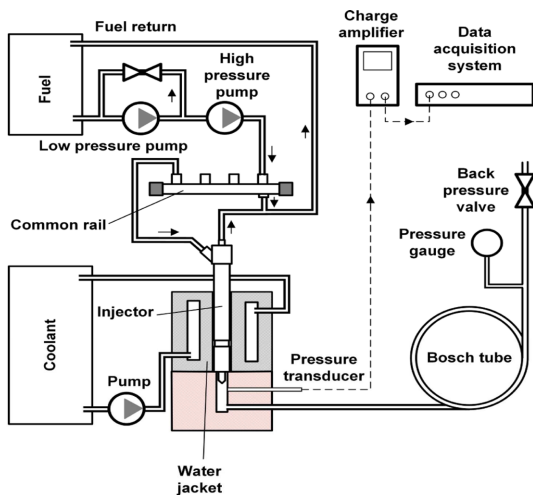


Fig. 1 Experimental set-up for injection rate measurement

실험으로서 Fig. 2에 제시한 바와 같이 인젝터 내 주요 오리피스의 유량계수의 수준을 확인하기 위해 오리피스 전단과 후단에 압력을 생성하여 토출되는 유량값을 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 또한 인젝터 내 동적 특성의 주요한 영향을 미치는 니들부의 거동 특성을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 X-ray 기반 가시화 실험이 가능한 Argonne Nat. Lab의장비를 활용하여 모델 검증

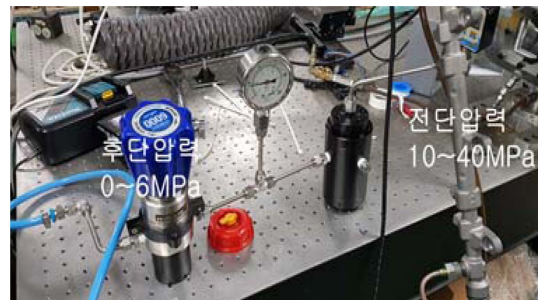


Fig. 2 Experimental set-up for  $C_d$  measurement of orifices inside injector

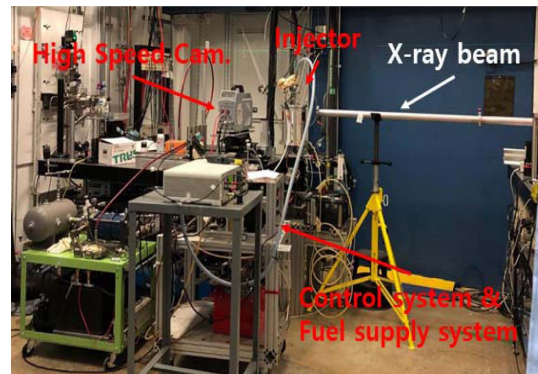


Fig. 3 Experimental set-up for  $C_d$  measurement of orifices inside injector

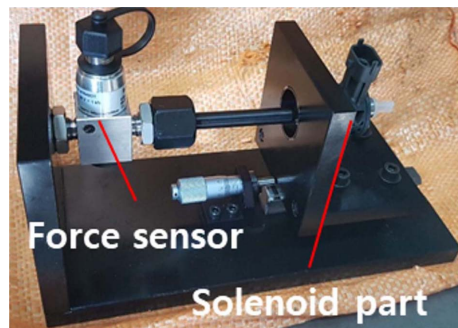


Fig. 4 Experimental set-up for  $C_d$  measurement of orifices inside injector

Table 1 Conditions for experiment and modelling

Fuel type	Commercial diesel fuel
Fuel temperature [K]	313.15
Injection pressure [MPa]	30, 120, 200
Injection duration [μs]	150, 450, 1000

Table 2 Injector specification for experiment and modelling

Operating type	Solenoid driven type
Hole number	#8
Injection angle	153°
Max. injection pressure	Up to 200MPa

및 개선에 활용하였다. 마지막으로 Fig. 4와 같이 솔레노이드부의 전자기력 수치를 정량적으로 얻기 위해 역각센서(force sensor)를 기반으로 하는 지그를 구성하여 에어갭(air gap)에 따른 측정을 수행하였다. 모델 구축에 활용한 인젝터와 모델 검증에 위해 평가한 조건을 아래 Table 1에 정리하였다. 연료는 상용 디젤을 사용하였으며, 온도는 상온을 유지하였다. 일반적인 승용디젤엔진의 저, 중, 고부하 운전 영역을 반영하기 위해 분사압력은 30, 120, 200 MPa, 분사기간은 150, 450, 1000 μs 조건에서 분사율을 실험과 모델을 기반으로 취득하여 비교 검증하였다.

2.2 적용 인젝터의 제원 및 작동원리

본 연구에서 모델 및 실험에 사용한 인젝터는 홀수는 8개, 분사각은 153°, 최대 분사압은 200 MPa인 솔레노이드 구동 방식으로 Table 2에 나타내었다. 인젝터의 솔레노이드 밸브에 픽업(pick-up) 전류가 인가되면 아마추어(amature)를 들어 올리려는 힘이 밸브 스프링의 힘보다 커지면서 연료가 토출되는 오리피스가 열리게 되며 동시에 픽업전류는 유지(holding)전류로 감소한다. 이때 제어체적에 있던 연료들이 오리피스를 통해 빠져나감에 따라 제어체적 내부의 압력이 감소하게 된다. 결국 니들에 가해지는 압력은 레일의 압력과 같기 때문에 결과적으로 밸브 컨트롤 플런저의 단면에 작용하는 힘과 노즐스프링의 저항력을 합한 힘보다 니들에 작용하는 상승력이 더 커지면서 분사가 되는 방식으로 작동된다.

3. AMESim 기반 인젝터 모델 구성

3.1 초기 모델 구성 및 그 한계

1-D 기반의 인젝터 모델을 구축하기 위한 첫 번째 단계는 상세 도면을 구축하는 것이다. AMESim에 제공되는 기계, 유압, 전기 시스템의 물리 모델 라이브러리를 조합하여 구현하고자 하는 전체 시스템을 구현할 수 있다. 다만, 각각의 물리 모델에는 세부적인 상세 치수 등의 물리값을 지정해주어야 한다. 따라서 Fig. 5(A)와 같이 대상 인젝터를 분해하여 주요 부품에 대한 정밀측정을 수행하였다. 또한 섹 체적(Sac volume)을 통과해 외부로 연료가 토출되는 인젝터 노즐 오리피스와 제어 체적과 제어 체적을 통과하는 연료가 유입과 유출하는 오

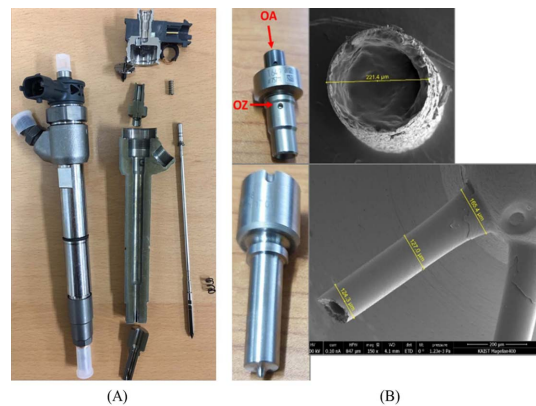


Fig. 5 Reverse engineering for dimension acquisition with direct imaging (A), silicone molding method (B)

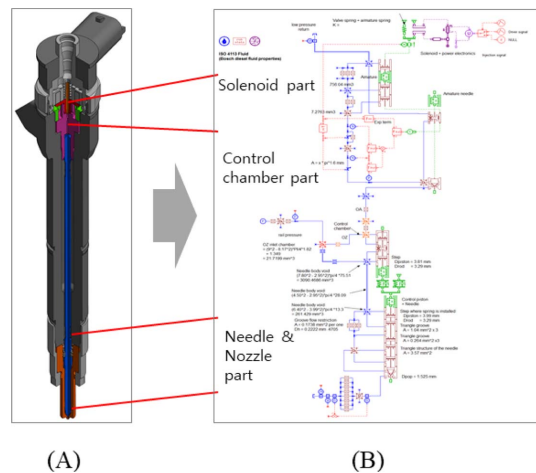


Fig. 6 3D drawing from precise measurement (A), early AMESim model for silicone molding method (B)

리피스(OZ: fuel inlet, OA: fuel outlet)의 직경은 인젝터 니들의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 이에 실리콘 몰딩을 이용해 관련 형상을 만들고 이를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 Fig. 5(B)와 같이 오리피스 직경을 측정하였다. 취득한 세부 치수 등을 기반으로 Fig. 6(A)와 같은 3차원 도면을 작성하였으며, 이를 통해 Fig. 6(B)에 나타낸 바와 같이 AMESim기반 인젝터 초기 모델을 구성하였다. 인젝터 모델은 최상단에 솔레노이드 부, 중간에 제어 챔버 부, 최하단에 니들과 노즐부로 구분하여 구성하였으며, 모델의 붉은색은 신호 및 전기제어, 녹색은 기계부품, 파랑색과 갈색은 유압부에 해당하는 구성요소를 의미한다. 인젝터 내부 형상에 대한 상세 치수를 기반으로 구성된 모델에 기반한 시뮬레이션을 통해 각 조건에서 분사율 결과를 얻었으며, 기 구축한 실험 장치를 활용하여 동일 조건에서 취득한 결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(A)와 (B)는 분사압 1200 bar 조건에서 분사시간 450  $\mu$ s와 1000  $\mu$ s대한 실험과 모델의 분사율

비교 결과이며, 연소 과정에서 분사율 형상이 의미를 가지는 영역을 A, B, C로 구분하였다. A영역은 실제 분사가 개시되는 시점, B영역은 분사율 상승 기울기 마지막으로 C영역은 분사율 하강기울기를 나타낸다. (A), (B) 결과로부터 분사율 최대 값은 모델과 실험결과 동등 수준을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 니들 완전 개방 조건에서 노즐의 유량계수가 적절히 선정되었음을 확인하여주는 결과이다. 다만, 음영으로 구분한 영역에 대해서는 모델과 실험 결과에 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 분사율을 적분하여 구해진 분사량 관점에서 각각 17.1%와 3.8% 수준의 차이를 보여 현 수준의 모델의 한계를 확인하였다. 해당 영역은 분사율 발달 과정에서 과도기에 해당하기 때문에 니들의 상승 및 하강 과정에 대한 정확성이 향상시키는 것이 중요한 모델 개선 방향이 되며, 이는 제어 챔버의 압력 거동을 개선하는 작업, 즉, OA와 OZ 오리피스에 대한 유량계수 특성을 정확하게 반영하는 것을 필요로 한다. 또한 솔레노이드 파트에서 발생하는 전자기력에 대한 특성을 파악하는 작업을 요구한다.

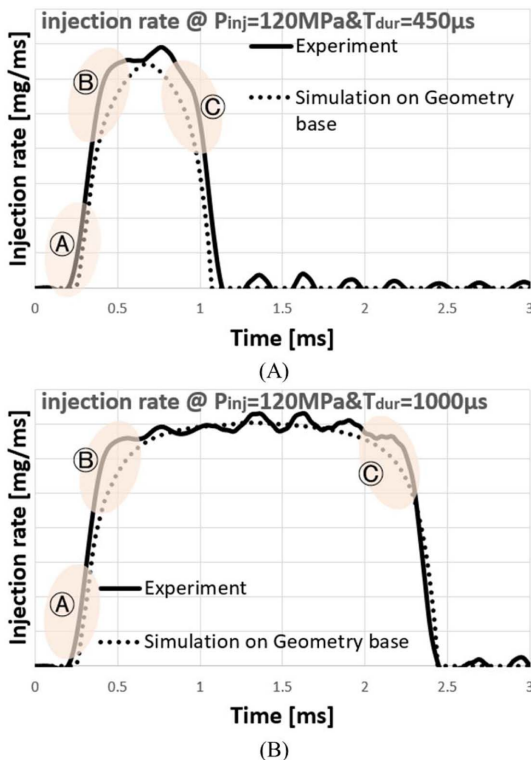


Fig. 7 Comparison of injection rate between experiment and simulation with early model based on detailed geometry for  $P_{inj}$ : 120 MPa and  $T_{dur}$ : of 450  $\mu$ s (A) and  $P_{inj}$ : 120 MPa and  $T_{dur}$ : of 1000  $\mu$ s (B)

### 3.2 실험적 방법을 통한 모델 개선구성

모델 개선을 위한 첫 단계로 Fig. 4에 나타난 에어갭에 따른 전자기력 측정을 수행하였으며, 인젝터에 부과되는 주요 전류값을 고정하여 정량적 수치를 취득하였다. Fig. 8(A)에 인가 전류가 12A인 조건에서 에어갭 변화에 따라 측정된 전자기력을 도시하였다. 예상되었던 경향을 확인할 수 있었으며, 측정된 정량적 수치를 룩업 테이블(look-up table)화 하여 솔레노이드부의 모델을 수정하였다<sup>(8)</sup>. 또한 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 Argonne Nat. Lab의 x-ray 기반 인젝터 내부 동적 거동을 직접 촬영하여 분사 조건에 따른 인젝터 니들의 변위의 시간에 따른 변화에 대한 정량적 값을 도출하였다. 이 측정값들은 모델과 실험의 분사율 관점에서의 정확도 개선을 위

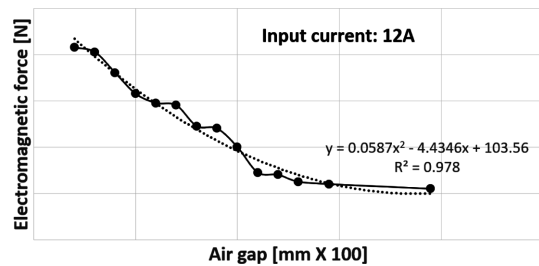


Fig. 8 Result of electromagnetic force regarding air gap with 12A of input signal

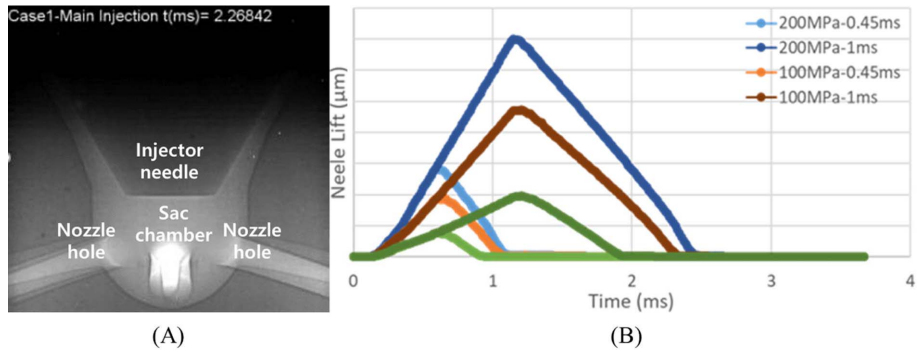


Fig. 9 Still image of injector needle lift dynamics (A), and needle lift profile regarding injection parameters (B)

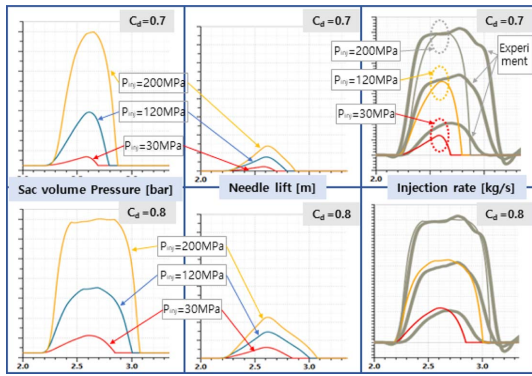


Fig. 10 Result of parametric study with  $C_d$  change of OA orifice under  $T_{dur}$ : 450  $\mu s$  with  $P_{inj}$  of 30, 120 and 200 MPa

해 모델 내 다양한 변수를 최적화하는 중간 과정에서 검증자료를 제공해준다. 따라서 모델 내 튜닝 변수의 물리적 범위를 제한해준다는 점에서 큰 의미를 가진다. Fig. 10에 모델 개선에 대한 한 예시를 나타내었다. 제어체적부에서 연료가 방출되는 OA 오리피스의 유량계수 선정에 관하여  $C_d$ 가 0.7에서 0.8로 변화 시에 색 체적, 니들 거동 그리고 분사울 형상의 변화를 보여주고 있다. OA오리피스의 유량계수가 작은 경우, 제어 체적부에서의 출구 유량이 감소하게 되고, 그로인해 니들 변위 시점과 상승 속도가 낮아지게 되어 최종적으로 분사울 축소 현상이 강화되는 것을 확인할 수 있다. 동일한 방식으로 OZ오리피스, 노즐 오리피스의 유량계수에 대해서도 실험값 범위 내에서 경향성 파악을 통한 최적값을 도출해 내었다. 유량계수의 경우, 레이놀즈 수와 밀접한 관계가 있으며 이는 분사 기간 동안과 분사압력 조건에 따라 유량계수가 지속적으로 변하는 것을 의미한다. 관련한 한 예시로 Fig. 11에 임계유량수(Critical

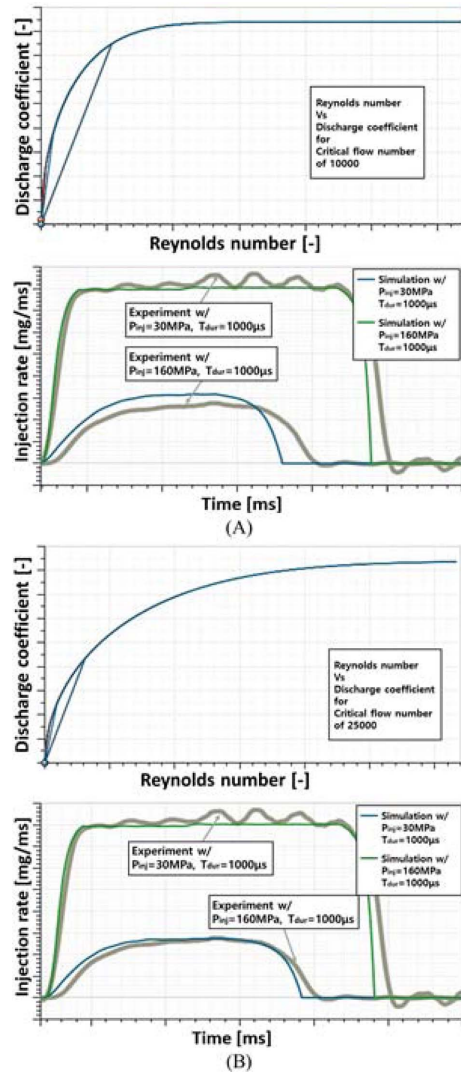


Fig. 11 Result of parametric study with critical flow number of nozzle orifice under  $T_{dur}$ : 1000  $\mu s$  with  $P_{inj}$  of 30 and 200 MPa

flow number)변경에 따른 레이놀즈수와 유량계수의 관계와 분사율에 대한 영향도를 나타내었다. AMESim에서 임계유량계수는 유체의 특성이 층류에서 난류로 전이하는 임계레이놀즈수의 80%값을 의미한다. 임계유량수가 25000에서 10000으로 감소할 때, 유량 계수가 낮은 레이놀즈 수에서도 상대적으로 높은 값을 형성함을 확인할 수 있다. 그 결과 낮은 분사압력에서는 분사율 최대값이 증가하고 분사종료 시점이 진각되지만, 분사압이 높은 경우에는 분사율 형상에 큰 영향이 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 낮은 분사압력 조건에서는 유량계수가 높은 영역을 유지하게 되어, 이들의 하강속도가 빨라지고 색체적 내 압력이 낮아지기 때문이다. 반면,

고압 분사의 경우, 임계유량수 변화에 관계없이 분사기간 동안 유체가 난류상태를 유지하기 때문에 유량계수에 변화가 상대적으로 적어 분사율에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 상술한 바와 같이 본 연구에서 제시된 주요 튜닝 파라미터의 경향성에 대한 이해를 통해 분사율 형상 예측 정확도를 향상시킬 수가 있다. 물론 그 외에도 최적화에 요구되는 인자들이 있을 수 있으나, 상대적인 영향도는 크지 않을 것으로 판단된다. 기존 인젝터의 상세 도면에 기반을 두어 모델을 구성할 때는 최종 분사율 형상 결과만이 주요 튜닝 파라미터 값의 변경 시 판단이 기준이 되었다. 하지만, 제어체적부와 노즐부의 오리피스와 니들거동에 대한 실험 결과를 함께 고려할 수 있기 때문에 모델 결과의 실험값에 대한 추종성을 향상시키고자 할 때 물리적인 범위를 벗어나는 값을 선정할 수 있는 여지를 배제할 수 있다. 또한 일부 작동 조건에서만 성립하는 모델이 아닌 범용성을 확보한 모델 구축이 가능하게 되었다. 이상의 모델 개선과정을 통해 Fig. 12과 같이 변경된 모델 스케치를 나타내었다. 개선된 주요 부분은 첫 번째 솔레노이드부의 출력값을 인가 전류에 따른 전자기력을 실측값 기반으로 변경하였고, 두 번째 노즐과 제어챔버부의 주요

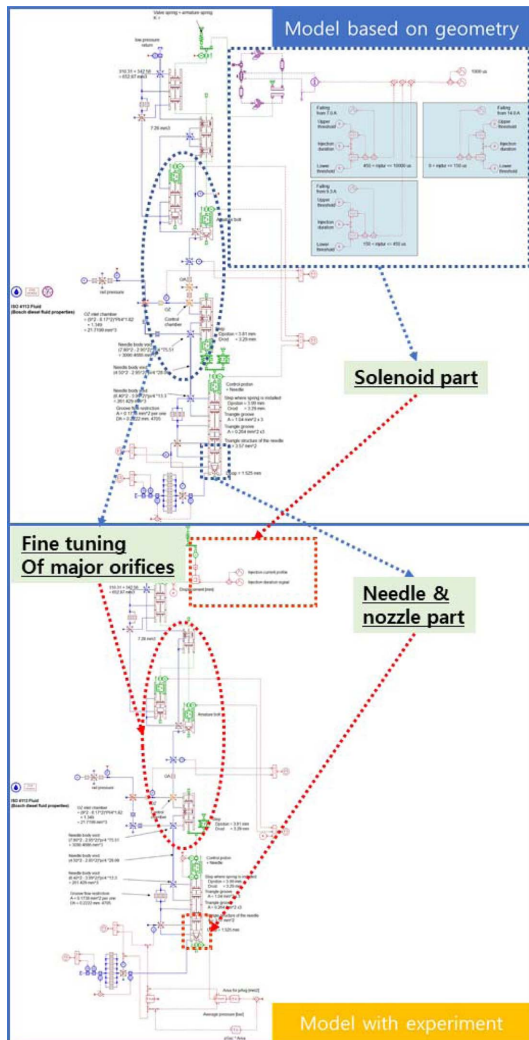


Fig. 12 Comparison of model change for solenoid, needle, nozzle and major orifices part

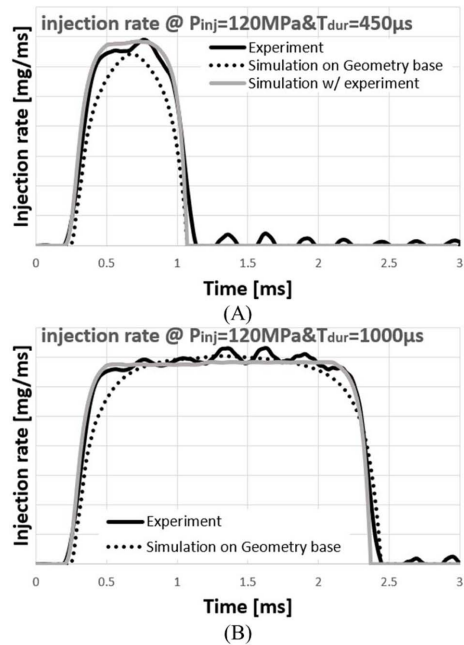


Fig. 13 Comparison of injection rate between experiment and simulation with early model and improved model for  $P_{inj}$ : 120 MPa and  $T_{dur}$ : of 450  $\mu$ s (A) and  $P_{inj}$ : 120 MPa and  $T_{dur}$ : of 1000  $\mu$ s (B)

오리피스 부의 유량계수를 니들 거동과 색 체적의 압력 거동과 함께 고려하여 최적 치수를 선정하였다. Fig. 7 과 동일한 분사조건에서의 분사율을 실험 수행을 통한 결과와 초기 모델 결과 그리고 개선 모델 결과를 함께 Fig. 13에 도시하였다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯 이 실제 분사 개시 시점, 분사율 상승 기울기, 분사율 하강 기울기가 초기 모델 대비 실험 결과와의 매칭이 매우 개선된 것을 확인할 수 있다. 이는 분사율을 적분한 분사량 관점으로는 실험과 개선모델의 경우, 각각 2.0%, 1.6% 수준을 보여 기존 모델의 17.1%, 3.8%의 오차 대비 개선되었음을 보여준다.

#### 4. 결 론

가상 엔진 구축을 위한 첫 단계로서 연소 모델 시 요구되는 분사율을 예측할 수 있는 인젝터 모델을 AMESim 를 활용하여 1D로 구축하였으며, 아래와 같이 결론을 얻을 수 있었다.

(1) AMESim 기반 인젝터 모델 구성을 위해서는 역설계를 통한 인젝터 내부 부품의 상세 치수를 동반한 도면을 도출하는 것이 우선적으로 이루어져야 한다.

(2) 분사율 형상은 인젝터 니들 거동과 상당한 연관성을 가지며 이는 니들 상, 하단의 제어챔버부의 오리피스와 노즐부와 색체적의 오피리스의 설계가 중요한 영향을 미치는 인자이다.

(3) 따라서, 분사 조건에 따른 니들 거동 및 주요 오리피스의 유량계수의 정량적 수치를 실험을 통해 데이터베이스화 하는 것은 모델의 정확도 향상에 필수적인 단계로 판단된다.

(4) 본 연구에서 적용한 분사 조건에서 개선 모델은 분사량 관점으로 실험과 모델의 오차 수준이 2.0% 내외로 우수한 결과를 보였다.

(5) 향후, 본 연구 결과를 기반으로 연료 온도 및 연료 성상 변경에 따른 분사율 경향을 모사할 수 있는 모델을 구축할 예정이다.

#### 후 기

본 논문은 현대자동차 NGV 산학협력(연료성상 및 온

도 변화에 따른 분사량 및 분사율 예측 강건 1-D 모델 개발(과제번호: 201920065)과제, 2016년도 정부(교육부), 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2016R1D1A1B03931298)과 산업통상자원부 에너지 기술개발사업(미세먼지 저감 청정연료 DME 엔진 실증 연구사업(과제번호: 20182010106370))의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) 자동차 기술 및 정책개발 로드맵 연구, 한국자동차공학회, 2018.
- (2) B. Patrick, T. Ye, H. Stefan, O. Shahaboddin, L. Purvi, B. Derek and S. Tarun, "Virtual engine, controls, and calibration development in automated Co-Simulation environment", SAE Technical Paper 2016-01-0090, 2016.
- (3) J. Martin, F. Arnau, P. Piqueras, and A. Auñon, "Development of an integrated virtual engine model to simulate new standard testing cycles", SAE Technical Paper 2018-01-1413, 2018.
- (4) 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.
- (5) C. Lee, "A computer simulation of injection rate characteristics of solenoid type common rail injector according to injector driving current patterns", Journal of ILASS-Korea, Vol. 24, No. 3, 2019, pp. 105~113.
- (6) I. Jo, J. Kwon and J. Lee, "Analysis of dynamic characteristics in two-stage injection for CRDi injectors based on AMESim environment", Journal of ILASS-Korea, Vol. 17, No. 2, 2012, pp. 57~63.
- (7) R. Payri, F. J. Salvador, M. Carreres and J. De la Morena, "Fuel temperature influence on the performance of a last generation common-rail diesel ballistic injector. Part II: 1D model development, validation and analysis", Energy Convers Manage, Vo. 114, 2016, pp. 376~91.
- (8) www.hydraforce.com/svtraining/files/weiuge\_Chap4.pdf