

## 작동 연료온도가 Bypass type 피에조 인젝터의 분사 특성에 미치는 영향

조인수\* · 이진욱\*\*†

### Effects of Working Fuel Temperature on Injection Characteristics of Bypass Type Piezo Injector

Insu Cho and Jinwook Lee

**Key Words:** AMESim simulation code(AMESim 해석 코드), Dynamic characteristics(동특성), Piezo stack(피에조 스택), Inverse piezo-electric effect(역압전효과), Fuel temperature(연료 온도)

#### Abstract

Diesel vehicles suffer from poor starting and running problems at cold temperatures. Diesel vehicles have the characteristic that CO and PM are reduced or similarly discharged when going from low temperature to high temperature. In this study, a bypass type piezo injector for electronic control based common rail injection system was used. Numerical analysis using injector drive analysis model was performed to analyze injector drive and internal fuel flow characteristics according to fuel temperature change. The results show that the rate of density change due to the fuel temperature is proportional, and that the effect of the kinematic viscosity is relatively large between  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $0^{\circ}\text{C}$ . Comparing the results of temperature condition at  $0^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$ , it is considered that the viscosity is more correlated with the needle displacement than the pressure chamber of the delivery chamber.

#### 1. 서 론

최근 혹한기의 기록적인 한파 및 급격한 기온변화로 인해 경유 차량의 저온 시동불량 및 주행성 문제가 발생하고 있다. 이러한 경유의 저온 유동성문제에 대응하기 위하여 정부는 겨울철 기온변화에 따라 기간별로 겨울철 자동차용 경유의 저온 품질기준을 관리하고 있다<sup>(1)</sup>.

직접분사식 디젤엔진에서 착화지연시간은 분사된 액체 연료를 점화까지 이르게 하는 매우 복잡한 물리적 그리고 화학적 현상들에 의해 결정된다. 특히, 액상 연

료는 먼저 더 작은 droplet으로 부서지는 breakup/atomization, 공기 저항에 의한 감속 (drag), droplet의 모양이 뒤틀리는 distortion, droplet끼리의 상호작용인 collision/coalescence, 그리고 기체로의 증발 등의 물리적 현상을 겪게 된다<sup>(2)</sup>.

즉, 경유 차량은 기술된 차량과 비교하여 상이한 경향성을 가진다. CO와 PM의 배출특성은 온도가 고온에서 저온으로 갈 경우에 감소하거나 유사하게 배출하고 있는 것을 볼 수 있는데 반해, NOX, THC, CO<sub>2</sub>가 증가하는 경향을 가진다<sup>(3)</sup>.

연료 온도상승에( $15\sim 60^{\circ}\text{C}$ )으로 연료소비를 증가는 부하 50%의 경우에 최대 5.56% 증가하였으며, 부하 75%에서 최소로 증가하였다<sup>(4)</sup>.

연료 온도가 낮아질수록 연료의 기화특성 악화로 인해 분무 발달 과정 중반부터 분무 도달 거리가  $-30^{\circ}\text{C}$ 의 경우  $40^{\circ}\text{C}$ 대비 최대 11 mm 증가하는 것을 확인하였다<sup>(5)</sup>.

따라서, 본 연구는 디젤연료 차량에 적용되고 있는 전

(Received: 2 May 2019, Received in revised form: 17 Jun 2019, Accepted: 18 Jun 2019)

\*승실대학교 대학원 기계공학과 박사과정

\*\*승실대학교 기계공학부

†책임저자, 한국액체미립화학회 종신회원

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02) 820-0929

자제어기반 커먼레일 분사시스템용 바이패스 방식 피에조 인젝터를 대상으로 연료온도 변화에 따른 인젝터 구동 및 내부 연료 유동 특성을 분석한 것으로, 고압 피에조 인젝터 구동 해석모델을 통한 이론적 수치해석을 수행하였다.

## 2. 피에조 인젝터 해석 모델링

### 2.1 피에조 액추에이터 구동 원리

Figure 1은 바이패스 방식 고압 피에조 인젝터의 구동 전류파형을 나타낸 것이다. 충·방전 방식으로 전기적 제어되는 피에조 인젝터는 피에조 소자에 전기를 인가하여 역압전 효과를 발생시키고, 이때 발생하는 구동력을 이용하여 니들 구동이 이루어져 연료를 분사하게 된다.

피에조 스택(piezo stack)에 물리적 힘을 가하면 그 가해진 힘의 방향과 크기에 따라 전압이 발생하며 이것을 압전 효과라 하고, 반대로 전압을 가하면 극과 크기에 따라 스택의 길이가 변하는데 이를 역 압전효과(inverse piezoelectric effect)라 한다<sup>(6)</sup>.

### 2.2 바이패스 방식 피에조 인젝터 작동 원리

본 연구의 수치 해석 모델은 피에조 액추에이터에 의해 내부 니들이 구동되는 바이패스 방식 피에조 인젝터(Bosch사)를 대상으로 선정하였다.

인젝터 모델에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. Table 1에 본 연구에 사용한 피에조 인젝터의 기본 사양을 나타내었다.

Figure 2는 바이패스 방식 피에조 인젝터의 내부 구조

Table 1 Specific of Bypass type piezo injector

Max. system pressure (bar)	1,800/2,000
Max. number of injections	8
Min. injection separation time (μs)	200
Emission target	Euro 5, Euro 6, T2B5, US10, JPNLT

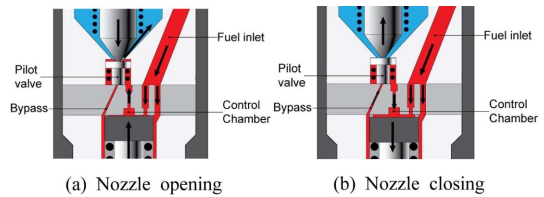


Fig. 2 Nozzle opening/closing stage of piezo injector

를 나타낸 것으로, 고압 연료가 인젝터 내부의 fuel inlet을 통하여 컨트롤 챔버, 딜리버리 챔버, 바이패스, 니들 주변, 각 노즐로 구성된 인젝터 내부를 일정한 압력으로 유지할 수 있도록 공급된다.

Figure 2(a)와 같이 피에조 스택의 팽창으로 파일럿 밸브가 열리게 되면 컨트롤 챔버 내부의 연료가 리턴된다. 파일럿 밸브의 변위 발생은 연료 리턴과 바이패스 라인의 유량을 동시에 제어하는 ‘밸브’의 기능을 하게 된다.

파일럿 밸브가 열림으로 연료가 리턴되고 낮아진 컨트롤 챔버 내부 압력으로 니들 변위가 발생하며 인젝터 하단의 노즐을 통해 고압의 연료가 분사된다. 이때, 바이패스 라인은 파일럿 밸브로 닫히게 된다. 반대로, Fig. 2(b)와 같이 피에조 스택이 본래의 위치로 수축되면 파일럿 밸브가 닫히게 되고 바이패스 라인으로 고압의 연료 유동이 가능하게 된다. 이 결과, 컨트롤 챔버 압력이 회복되는데, 바이패스 라인을 통한 딜리버리 챔버로의 유량이 추가적으로 확보되어, 딜리버리 챔버로의 유량 공급량이 증가되는 특징이 있고, 두 챔버의 압력이 일치하게 되어 니들은 노즐을 닫아 연료 분사가 종료된다.

### 2.3 바이패스 방식 피에조 인젝터 모델링

Figure 3은 앞서 설명한 인젝터 내부의 컨트롤 챔버와 딜리버리 챔버의 연료 압력차이로 구동되는 인젝터의 고압연료의 흐름을 나타낸 것이다. 파일럿 밸브에서 딜

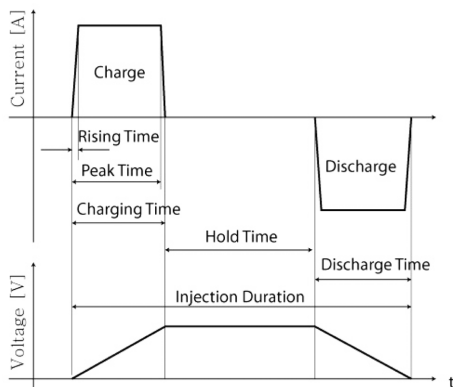


Fig. 1 Driving current wave of piezo injector

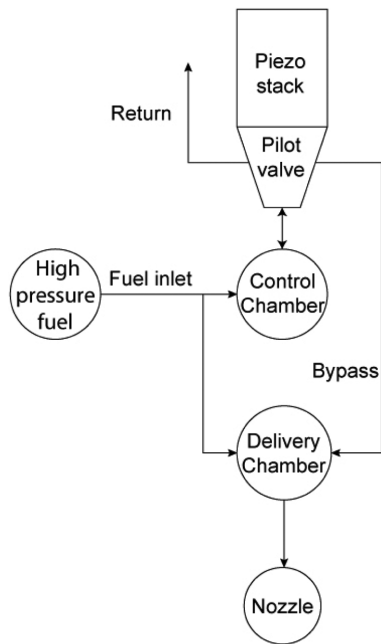


Fig. 3 Flow chart showing hydraulic circuit system of piezo injector

리버리 챔버로 이동되는 유동은 분사가 종료될 때만 유효하다.

Figure 4은 Fig. 3의 개략도를 기반으로 AMESim 수치해석 코드를 이용하여 개발한 바이패스 방식 피에조 인젝터 모델이며, 피에조 액추에이터는 IEEE standard를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 피에조 인젝터의 파일럿 밸브 모델 중 컨트롤 챔버에서 고압연료가 리턴될 때 영향을 주는 밸브는 원뿔형상이지만 밸브형상에 따른 영향은 무시할 수 있기 때문에 원형 밸브를 사용하였다.

파일럿 밸브는 연료리턴과 바이패스 개폐를 위한 두 가지 역할을 담당하기 때문에 플래퍼 밸브 적용으로 이를 구현하였다.

컨트롤 챔버는 니들 변위에 따라 체적이 변하는 특징으로 니들 상단에 피스톤과 챔버 요소의 조합으로 구성하였다.

딜리버리 챔버는 니들에 위치하고 니들 표면을 따라 바이패스 라인과 연결되어 있기에 피스톤과 챔버를 연결하여 모델링 하였다.

노즐은 입구와 출구의 직경이 동일한 오리피스 요소

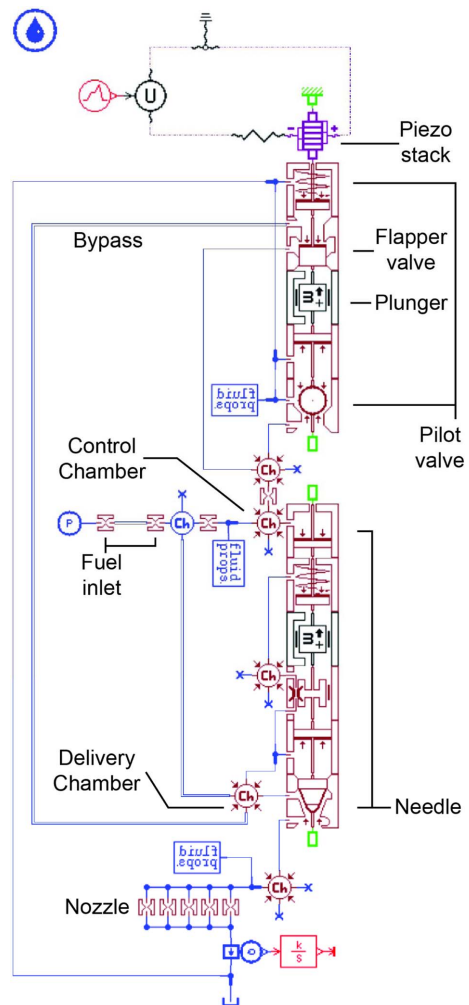

















Fig. 4 AMESim model corresponding to piezo injector's internal structure

를 5개 병렬 연결하였으며, 오리피스 출부 부를 하나의 라인으로 연결하여 유량 센서를 통해 분사량을 측정하도록 구성하였다. 누적 분사량을 측정하기 위한 적분기도 오른쪽에 연결되었다.

분사 과정 중 연료의 동점성계수(kinematic viscosity), 밀도(fuel density) 등을 측정하기 위한 물성치 측정기를 파일럿 밸브 출구, 컨트롤 밸브 전단, 노즐전단에 연결하였다.

완성된 바이패스 방식 피에조 인젝터의 내부 유압해석 인젝터 모델에 사용된 주요 기본단위 모델 요소를 Table 2에 요약해서 나타내었다.

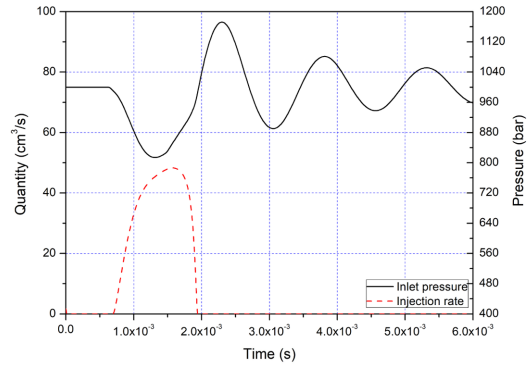
Table 2 Essential elements list of piezo injector mode in AMESim environment

	Piecewise linear signal source
	Variable voltage source
	Linear pzt stack actuator
	Piston with spring
	Flapper nozzle valve
	Mass with friction and ideal end stops
	Piston
	Ball poppet with conical seat
	Hydraulic volume with pressure dynamics
	Fixed hydraulic orifice with zero volume source
	Piecewise linear hydraulic pressure source
	Leakage and viscous friction
	Poppet with conical seat
	Hydraulic flow rate sensor with offset and gain
	Integrator

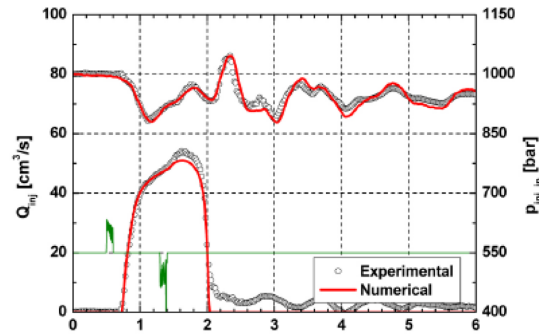
### 3. 연구 결과

#### 3.1 해석모델 검증

본 연구에서 개발한 해석모델은 참고문헌<sup>(7)</sup>에서 인용한 3세대 피에조 인젝터의 실제 실험 데이터 자료와의 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다. 먼저, fuel inlet의 압력변동, 연료 분사율의 경향성을 비교하였다. 실험 조건과 동일한 구동 조건으로 energizing time(스택의 방전 전까지의 시간)은 800  $\mu$ s이며, 연료압력은 1000 bar로 모델

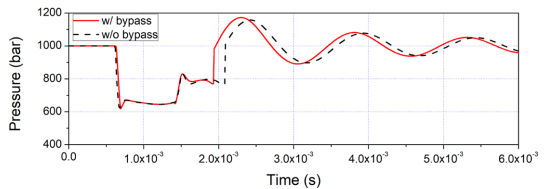


(a) Numerical Result

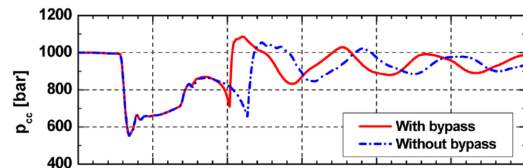


(b) Reference data (Experimental Result)<sup>(7)</sup>

Fig. 5 Verification of new analytic model with experimental result



(a) Numerical Result



(b) Reference data (Experimental Result)<sup>(7)</sup>

Fig. 6 Verification of new analytic model at control chamber

해석을 수행하여 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

압력변동의 경우 유사한 패턴을 보였으며, 분사율의 적분량은 실험결과보다 다소 적지만, 최대 분사율 (약 50  $\text{cm}^3/\text{s}$ ) 및 패턴은 거의 일치하는 경향성을 가짐을 확인할 수 있었다.

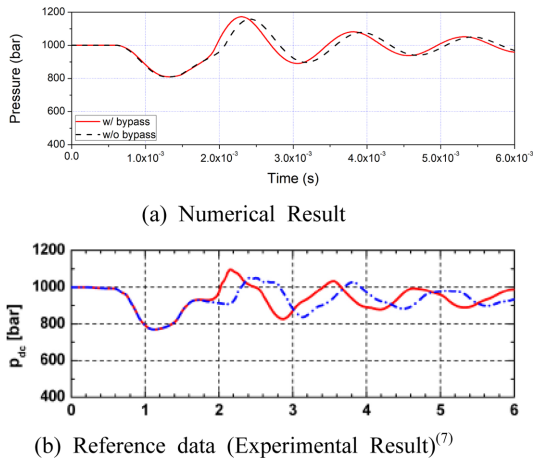


Fig. 7 Verification of new analytic model at delivery chamber

Table 3 Numerical conditions

Fuel temperature (°C)	-20	0	20	40
Fuel pressure (bar)	1,000			
Injection Duration (μs)	800			

Figure 6과 Fig. 7은 3세대 피에조 인젝터 컨트롤 챔버 및 딜리버리 챔버 내부 압력변화를 바이패스 유무에 따라 수치 해석한 결과를 나타낸 것이다. 바이패스 라인이 있을 때(실선)와 없을 때(점선)의 응답성을 비교해보면, 최대 압력강하 값과 패턴이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

### 3.2 연료온도 변수에 따른 유동 특성 평가

본 연구에서는 연료온도에 따른 인젝터 구동 특성 및 내부 유동 특성을 파악하고자 Table 3에 표시한 Parameter로 해석을 수행하였다.

Figure 8은 연료분사량과 동점성계수 및 연료밀도의 상관관계를 나타낸 것이다. 연료의 온도 상승으로 밀도와 동점성계수가 동시에 낮아지는 특성을 보이며, 그래프 축이 동일한 스케일임을 고려하면, 밀도변화율이 동점성계수 대비 더욱 큰 것을 알 수 있었다. 특히, -20°C와 0°C 구간은 동점성계수의 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다.

Figure 9는 fuel inlet에서 컨트롤 챔버를 지난 후 리턴 밸브와 노즐로 이동되는 연료 유동 과정을 고려하여, 순서별로 나타낸 연료 온도 변화에 따른 밀도 해석 결과

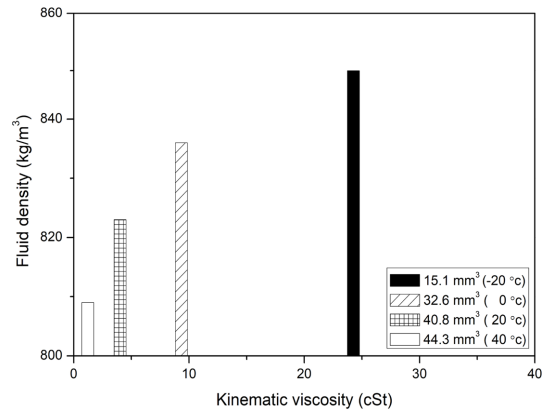


Fig. 8 Fuel properties by temperature variation

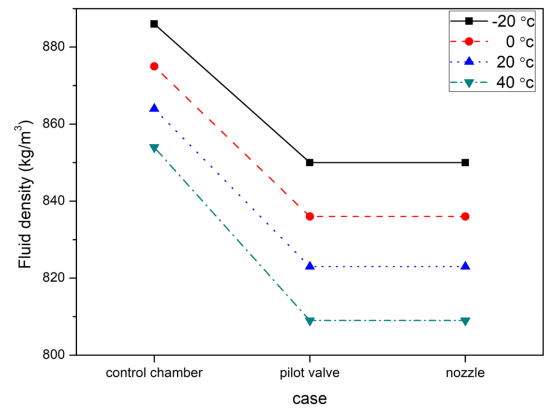


Fig. 9 Quantity of fuel density at control chamber, pilot valve, nozzle

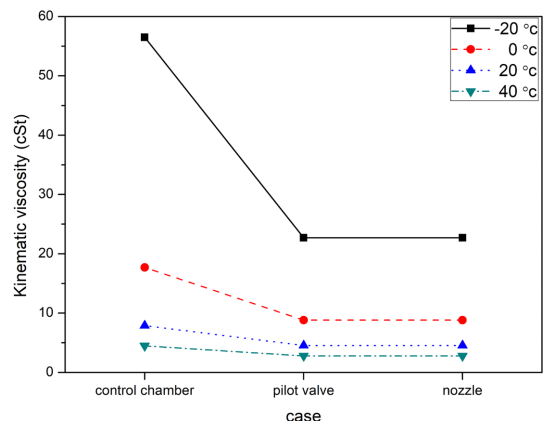


Fig. 10 Kinematic viscosity at control chamber, pilot valve, nozzle

이다. fuel inlet에서 컨트롤 밸브로 이동하는 중간에 밀도가 상승했고, 리턴밸브 및 노즐을 유동하는 연료는 동

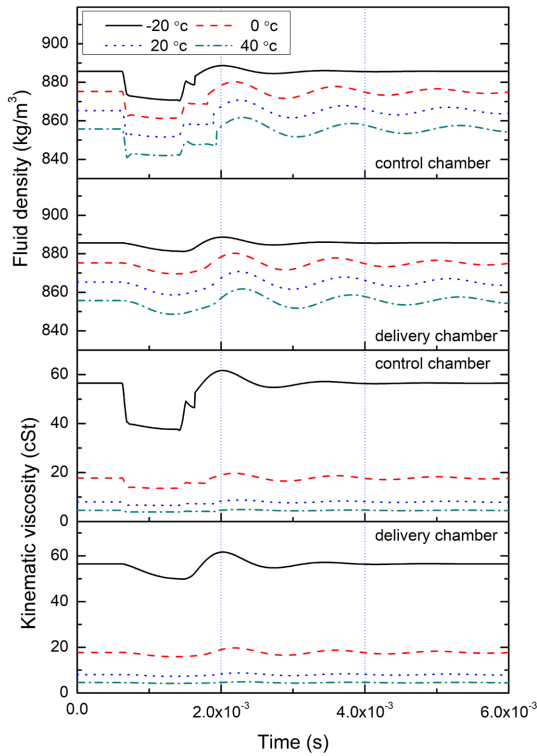


Fig. 11 Fluctuation of fuel density and kinematic viscosity at control chamber and delivery chamber

일하게 낮아진 밀도값을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 연료온도 상승으로 밀도 변화율은 미소하게 증가하였다.

Figure 10은 온도변화에 따른 컨트롤 챔버 진단, 파일럿밸브 출구, 노즐에서의 동점성 계수를 나타낸 것이다. 컨트롤 챔버에서 높아진 값을 보인 후 파일럿밸브 및 노즐에서 낮아지는 유사한 경향을 보였다.

그러나, 밀도는 온도 변화에 따라 비례적인 특성을 보인다고 판단할 수 있으나, 동점성계수의 경우 연료 온도 상승으로 급격한 변화를 보이며,

특히 컨트롤 밸브 내부에서 가장 크게 나타나는 특징을 보였다.

Figure 11은 인젝터 연료 분사를 위해 니들 거동에 영향을 주는 컨트롤 챔버와 딜리버리 챔버의 인젝터 구동 중 내부 연료밀도 및 동점성계수 변화를 나타낸 것이다.

연료온도 상승으로 밀도 감소의 영향으로 분사 종료(약 2 ms) 후에도 일부 변동함을 보이며, 두 챔버의 압력차가 니들 거동의 원천이라는 관점에서 연료 온도 감소로 점성이 증가하며 변화폭이 크게 나타남을 알 수 있었다.

이러한 결과로 볼 때, 컨트롤 챔버 대비 딜리버리 챔

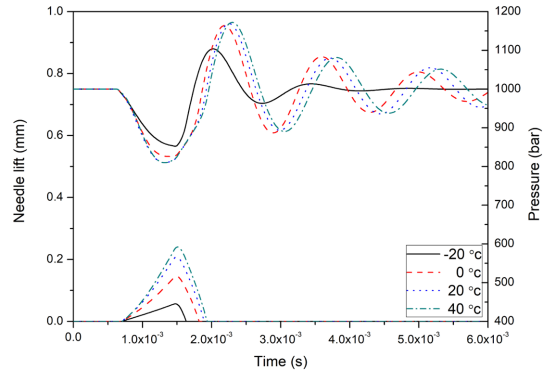


Fig. 12 Needle displacement and pressure variation at delivery chamber

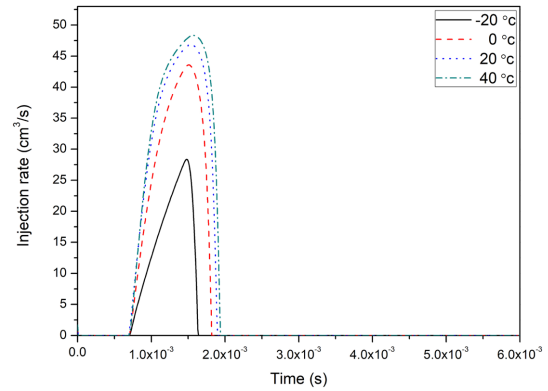


Fig. 13 Injection rate at difference temperature

버의 연료유동이 지연되어 원활한 내부유동을 저해할 것으로 판단된다.

Figure 12와 같이 낮아지는 연료 온도로 딜리버리 챔버 내부 압력 변동폭이 점차 감소되며, 특히 -20°C에서 다른 조건대비 급격한 압력감소를 보이며, 니들 변위 감소 및 빠른 단힘이 발생하였다. 이를 0, 20°C 온도 조건 결과를 비교해 보면, 딜리버리 챔버의 압력 변동보다 동점성도 변화가 니들변위와 상관관계가 높은 것으로 판단된다.

상기 결과를 종합한 결과, -20°C 조건에서 동점성도가 급격히 증가하게 되고, 상대적으로 딜리버리 챔버를 통한 유동 지연의 결과로 Fig. 13과 같이 연료 분사율이 급격하게 감소하는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 바이

패스 방식 피에조 인젝터를 대상으로 연료온도 변화에 따른 인젝터 구동 및 내부 연료 유동 특성을 분석을 목표로 수행되었으며 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 밀도는 온도 변화에 따라 비례적인 특성을 보인다고 판단할 수 있으나, 동점성계수의 경우 연료 온도 상승으로 급격한 변화를 보이며, 특히 컨트롤 밸브 내부에서 가장 크게 나타나는 특징을 보임을 알 수 있었다.

(2) 연료 온도 감소로 점성이 증가로 변화폭이 크게 나타났으며, 0, 20°C 온도 조건 결과를 비교해보면, 딜리버리 챔버의 압력 변동보다 동점성도 변화가 니들변위와 상관관계가 높은 것으로 판단된다.

(3) -20°C 조건에서 동점성도의 증가 및 변화폭이 가장 급격하고 연료의 밀도가 다소 감소하여, 인젝터 내부의 디젤 연료 압력차로 연료분사가 발생하는 분사장치의 특성에 영향을 미쳐서 응답성 및 분사량이 감소함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) 장은정, 김성우, 민경일, 박천규, 허종한, 이봉희, “연료물성에 따른 경유 차량의 저온성능 영향 연구”, 한국에너지학회, Vol. 24, No. 2, 2015.
- (2) 김두현, “스프레이 점화에 대한 연료 물성의 영향: 수치실험”, 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, Vol. 2018, No. 11, 2018.
- (3) 이민호, 임재혁, 김기호, 정충섭, “연료물성 및 환경조건에 따른 시험차량의 배출가스 특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, Vol. 2013, No. 11, 2013.
- (4) 조상곤, “디젤연료 온도변화가 기관성능 및 연소특성에 관한 연구”, 한국동력기계공학회지, Vol. 21, No. 6, 110-116, 2017.
- (5) 이진우, “디젤 연료 온도에 따른 분무 발달 특성”, 한국산학기술학회 논문지, Vol. 17, No. 3, 270-275, 2016.
- (6) Jin-Wook Lee and Kyoung-Doug Min, “Analysis of Macroscopic Spray Characteristics of Diesel Injectors with Three Different Needle Driving Type in Common Rail Direct Injection System”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 351-358, 2006.
- (7) A. Arpaia, A. E. Catania, A. Ferrari, and E. Spessa, “Development and Application of an Advanced Numerical Model for CR Piezo Indirect Acting Injection Systems”, SAE 2010-01-1503, 2010.

- (1) 장은정, 김성우, 민경일, 박천규, 허종한, 이봉희, “연료물성에 따른 경유 차량의 저온성능 영향 연구”, 한