

바이패스 방식 피에조 인젝터의 피에조 적층 및 인가전압에 따른 연료분사 특성 연구

조인수* · 김우택** · 이진욱**†

A Study on Injection Characteristics of Piezo Injector with Bypass by Various Piezo Stack and Applied Voltage

Insu Cho, Wootack Kim, and Jinwook Lee

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

Abstract

In the common rail fuel injection system, which is the core of diesel high efficiency and NO_x reduction, injection strategies such as high pressure injection of fuel, accurate injection rate control, and multistage injection are important to increase fuel atomization. In this study, the bypass type piezo injector for the electronic control based common rail injection system applied to diesel fuel vehicle was studied. In particular, the injection rate and internal fuel flow characteristics of the high-pressure injector according to the piezo stacking number and applied voltage were analyzed by theoretical numerical method. When the applied voltage changes, it is determined that additional fuel flow through the bypass compensates for the reduced valve driving force due to the change in the driving voltage.

1. 서 론

소형 디젤 엔진의 연비 개선 및 배기 배출물 저감을 위해서 노즐 형상 및 분무의 최적화는 지속적으로 요구되고 있다⁽¹⁾.

세탄가를 기반으로 하는 경유의 고효율과 NO_x저감의 핵심이라고 할 수 있는 커먼레일 연료분사 시스템에서는 연료의 무화를 높이기 위한 연료의 고압 분사와 정확한 분사율 제어, 다단분사와 같은 분사전략이 중요하

다⁽²⁾.

커먼레일 분사시스템은 한 사이클 내 다중 연료 분사가 가능한데 이는 dust 소음을 줄이고 NO_x PM등을 줄이는 효과가 있는 것으로 알려져 있다^(3,4). 커먼레일 연료분사시스템의 구동을 위한 기구로는 크게 솔레노이드 인젝터와 피에조 방식 인젝터가 있으며, 피에조 인젝터는 구동 전류 응답시간이 기존 솔레노이드 인젝터에 비해 빠른 것이 특징이다⁽⁵⁾.

최근 Euro 6가 시행됨에 따라 디젤 승용차에 대한 더 엄격한 NO_x 규제가 이루어져, 이를 대응하고자 디젤 산화 촉매, 디젤 미립자 필터 및 희박 NO_x 트랩 또는 선택적 촉매 환원을 포함하는 후 처리 배출 제어 패키지와 결합된 분사 압력 증가 기술의 적용이 예상된다⁽⁶⁾.

따라서 본 연구는 디젤연료를 사용하는 경유 차량에 적용되고 있는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 바이패스 방식 피에조 인젝터를 대상으로, 피에조 적층 수

(Received: 29 Oct 2019, Received in revised form: 2 Dec 2019, Accepted: 18 Dec 2019)

*숭실대학교 대학원 기계공학과

**숭실대학교 기계공학부

†책임저자, 한국분무공학회 종신회원

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929

및 인가전압 변화 시, 바이패스 유·무에 따른 인젝터 구동 및 내부 연료 유동 특성을 분석하고자 수행하였으며, 이를 위해 피에조 인젝터 구동 해석모델을 통한 이론적 수치해석을 진행하였다.

2. 피에조 인젝터 해석 모델링

2.1 피에조 액추에이터 구동 원리

Figure 1은 바이패스 방식 고압 피에조 인젝터의 구동 전류과형을 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⁽⁷⁾.

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

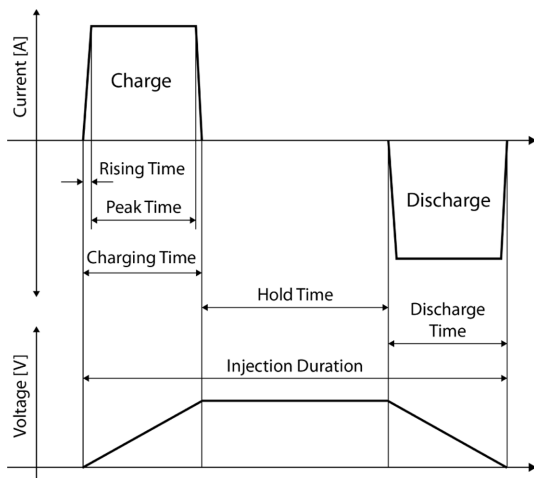


Fig. 1 Driving current wave of piezo injectors

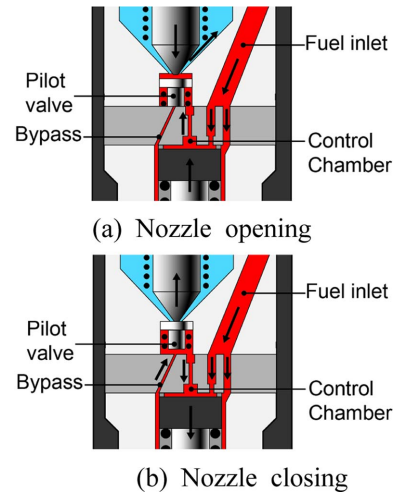


Fig. 2 Nozzle opening/closing stage of piezo injector

Table 1 Specific of Bypass type 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

피에조 인젝터의 기본사양을 나타내었다.

Figure 2는 바이패스 방식 피에조 인젝터의 내부 구조를 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 챔버로

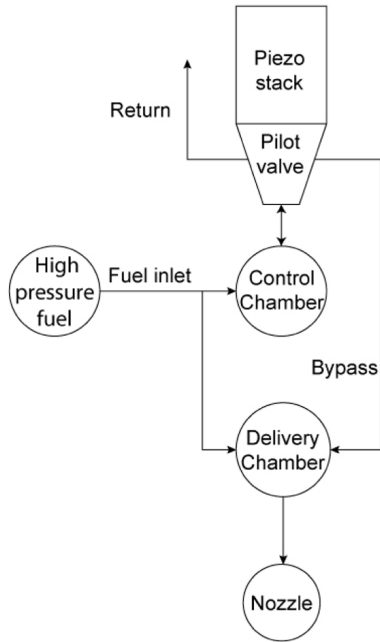


Fig. 3 Flow chart showing hydraulic circuit system of piezo injector

의 유료가 추가적으로 확보되어, 컨트롤 챔 버에 연료가 공급되어 압력회복 시간이 단축되는 특징이 있고, 두 챔 버의 압력이 일치하게 되어 니들은 노즐을 닫아 연료분 사가 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 딜리버리 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 내부 유동 특성에 주는 영향은 미약한 관계로 원형 밸브를 사용하였다.

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

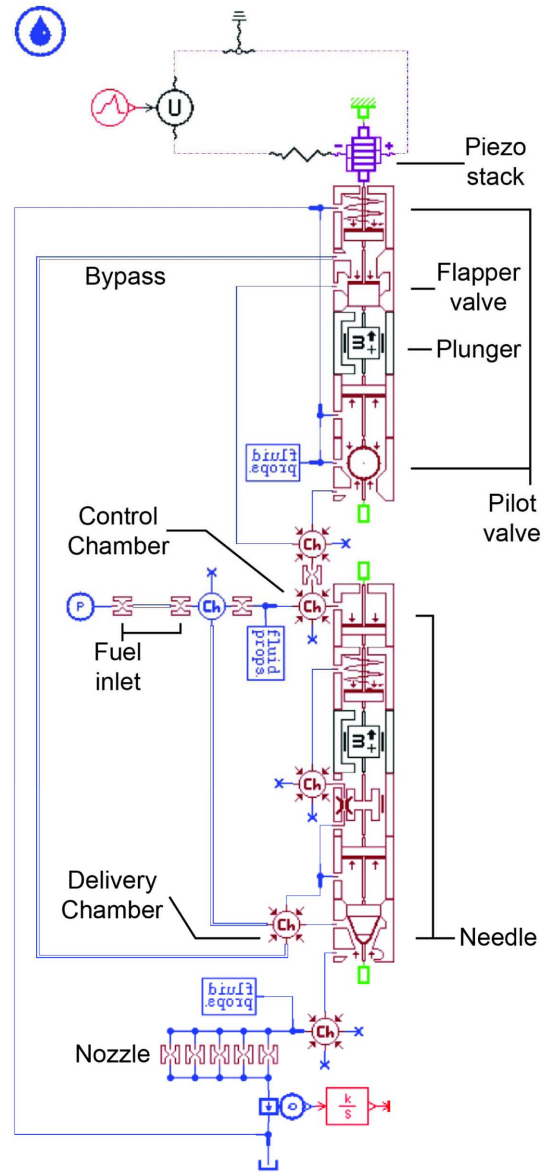


Fig. 4 AMESim model corresponding to piezo injector's internal structure

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

를 5개 병렬 연결하였으며, 오리피스 출부 부를 하나의 라인으로 연결하여 유량 센서를 통해 분사량을 측정하도록 구성하였다. 누적 분사량을 측정하기 위한 적분기를 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 유압 해석 인젝터 모델에 사용된 주요 기본단위 모델 요소를 Table 2에 요약해서 나타내었다.

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

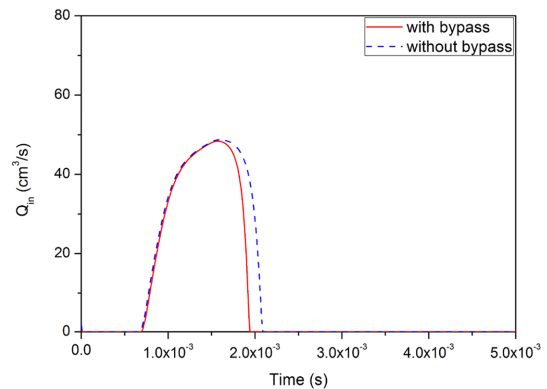
	piecewise linear signal source
	variable voltage source
	linear pzt stack actuator
	piston with spring
	flapper nozzle valve
	mass with friction and ideal end stops
	piston
	ball poppet with conical seat
	hydraulic volume with pressure dynamics
	fixed hydraulic orifice with zero volume source
	piecewise linear hydraulic pressure source
	leakage and viscous friction
	poppet with conical seat
	hydraulic flow rate sensor with offset and gain
	integrator

3. 연구 결과

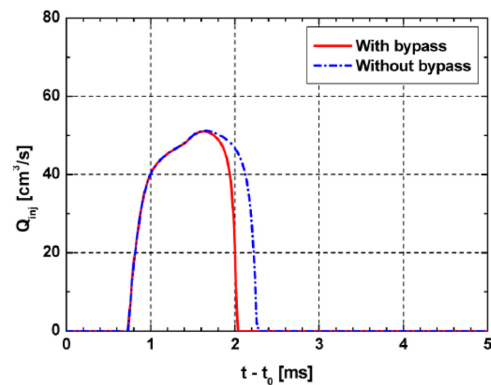
3.1 해석모델 검증

본 연구에서 개발한 해석모델은 참고문헌⁽⁸⁾에서 인용한 3세대 피에조 인젝터의 실제 실험 데이터 자료와의 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다. 먼저, 바이패스 유무에 따른 연료 분사율의 경향성을 비교하였다. 실험 조건과 동일한 구동 조건으로 energizing time(스택의 방전 전까지의 시간)은 800 μ s이며, 연료압력은 1000 bar로 모델 해석을 수행하여 비교한 분사율 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분사 duration, 최대 분사율(약 50 cm^3/s) 및 패턴은 거의 일치하는 경향성을 가짐을 확인할 수 있었다.

Figure 6과 Fig. 7은 3세대 피에조 인젝터 컨트롤 챔버 및 딜리버리 챔버 내부 압력변화를 바이패스 유·무에 따라 수치 해석한 결과를 나타낸 것이다. 바이패스 라인이 있을 때(실선)와 없을 때(점선)의 응답성을 비교해보면, 바이패스에 의한 컨트롤 챔버의 압력회복 속도 상승으로 빠른 응답성을 보이며, 실험과 해석의 압력발생



(a) Numerical Result



(b) Reference data (Experimental Result)⁽⁸⁾

Fig. 5 Verification of injection rate with analytic mode

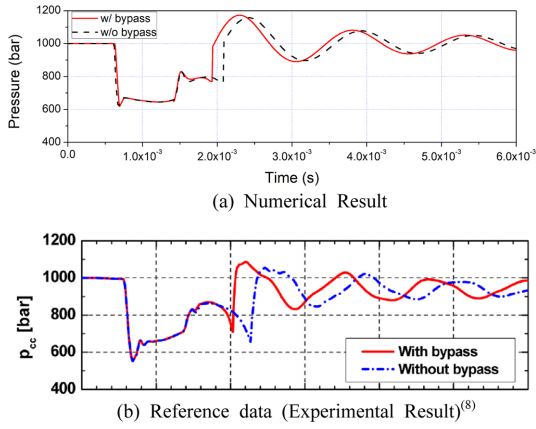


Fig. 6 Verification of new analytic model at control chamber

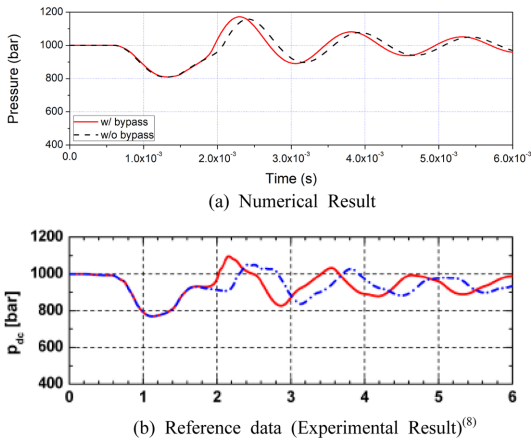


Fig. 7 Verification of new analytic model at delivery chamber

Table 3 Numerical conditions

	Value
Fuel pressure (bar)	1,000
Injection Duration (μ s)	800

Table 4 Variation for simulation

	Base		
Voltage (V)	200		
Piezo stack (number)	350	450	550
Piezo stack (number)	450		
Voltage (V)	150	200	250

시점 및 패턴이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

3.2 피에조 스택 개수 및 인가전압에 따른 분사 특성 평가

본 연구에서는 피에조스택 및 인가전압에 따른 인젝터 구동 특성 및 내부 유동 특성을 파악하기 위하여 Table 3에 표시한 Base값을 기준으로 Table 4의 Parameter를 적용하여 해석을 수행하였다.

Figure 8은 피에조 스택 개수 변화 시, 바이패스 유무에 따른 파일럿 밸브에서의 유량 및 변위를 나타낸 것이다. 바이패스 유무와 별개로, 밸브 변위는 스택 증가에 비례적으로 반응하지만, 리턴되는 유량은 스택 수 450 개 이상에서 영향이 없는 것을 알 수 있었다. 이는 노즐 직경 및 유효 내부 유동량의 한계로 인한 것으로 판단된다. 그러나 바이패스가 존재하는 경우, Fig. 8(b)에 표시한 것과 같이, 분사 시 내부 유동량 상승으로 스택수 증가로 초기 리턴되는 유량이 일시적으로 상승됨을 확인할 수 있었다.

Figure 9는 피에조 스택 개수 변화 시, 바이패스 유무에 따른 분사율을 나타낸 것으로, 스택수 350개로 는 스

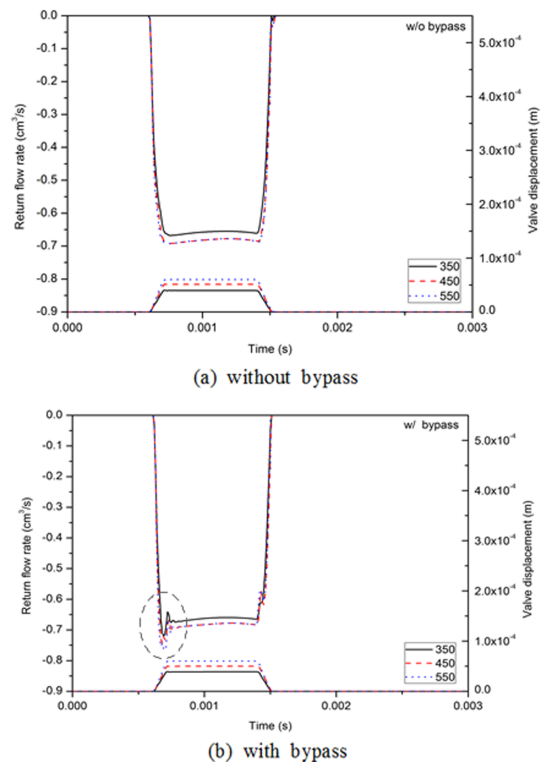


Fig. 8 Flow rate and displacement of pilot valve with variation by number of Piezo stack at 200V

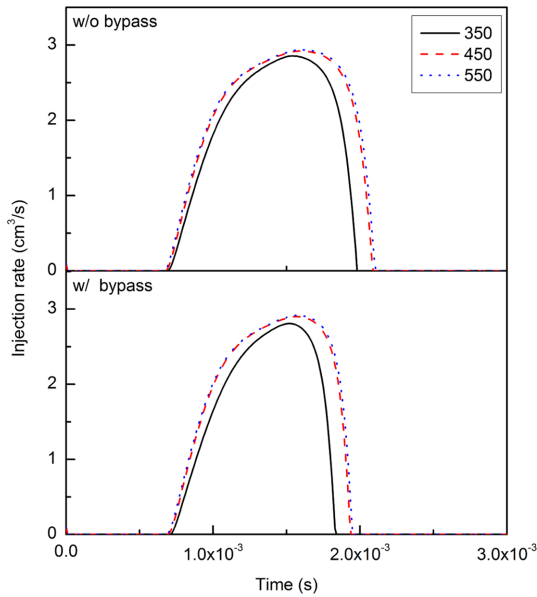


Fig. 9 Injection rate with variation by number of Piezo stack at 200V

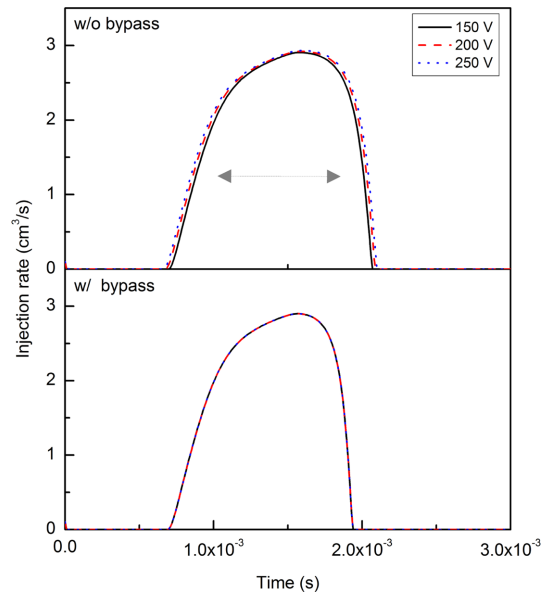
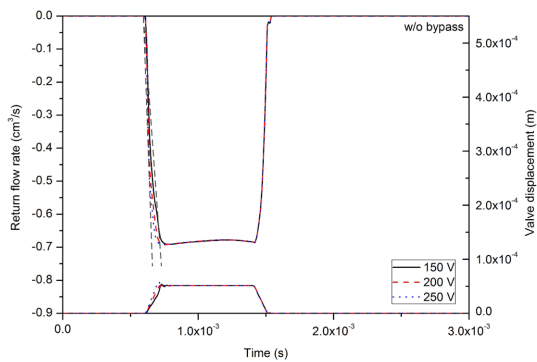
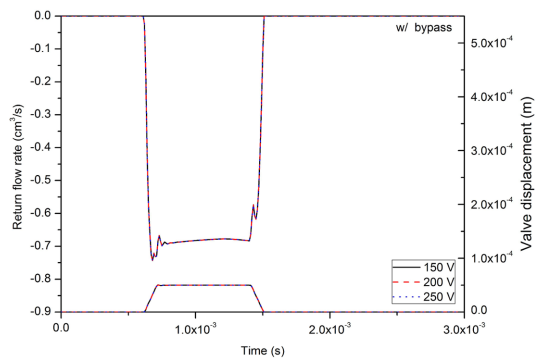


Fig. 11 Injector rate with variation by applied voltage with 450 stacks



(a) without bypass



(b) with bypass

Fig. 10 Flow rate and displacement of pilot valve with variation by applied voltage with 450 stacks

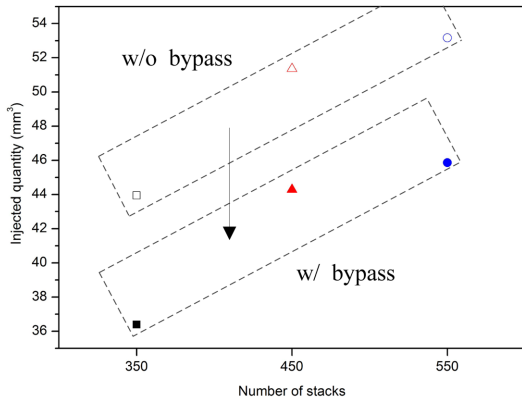
택변위의 부족으로 분사 중 바이패스의 leak이 발생하였다. 분사량이 제한된 조건에서 인젝터 내부 체적이 증가된 효과로 민감도가 낮아져 분사종료시기가 단축된 것으로 판단된다.

Figure 10은 인가전압 변화 시, 바이패스 유무에 따른 파일럿 밸브에서의 유량 및 변위를 나타낸 것이다. 바이패스가 있는 경우, 없는 조건 대비 구동 초기 파일럿 밸브의 변위 및 리턴 유량의 구배는 인가전압에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 인가전압의 변화보다 바이패스로 인한 내부 유량변화에 의한 영향이 지배적인 것에 기인한 것으로 판단된다.

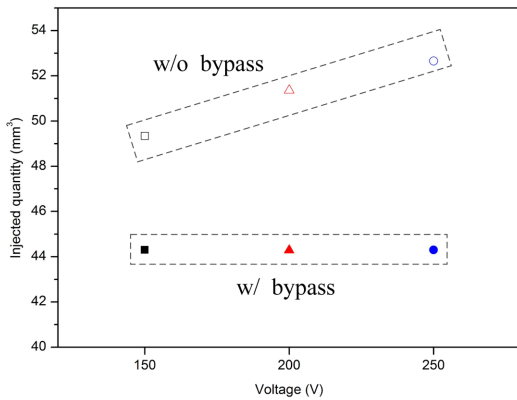
또한, 파일럿밸브 변위가 감소하며, 리턴유동의 Fluctuation이 발생하는데, 바이패스 라인을 통한 유압이 파일럿 밸브에 영향을 준 것으로 판단된다.

Figure 11은 인가전압 변화 시, 바이패스 유무에 따른 분사량을 나타낸 것이다. 바이패스가 없는 경우 인가전압 감소에 따라 분사율 형상은 일정하게 팽창하고 있으며, 인가전압의 영향을 받는 분사율 상승 및 하락구간에서 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 이에 반해, 바이패스가 작동하는 경우 일정한 분사율 결과를 보인다.

Figure 12는 피에조 스택 개수와 인가전압의 변화에 따른 전체 분사 누적량을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)의 결과와 같이, 피에조 스택의 개수는 바이패스 유·무와 관계없이 분사량에 영향을 미치고 있으며 변동의 경향



(a) Variation of the number of Piezo stack at 200V



(b) Variation of applied voltage with 450 stacks

Fig. 12 Comparison of injected fuel quantity

성 또한 유사함을 알 수 있었다. 그러나 바이패스로 인한 빠른 응답성으로 전반적인 낮은 분사율 수준으로 나타나고 있는 특징이 있다.

Figure 12(b)와 같이, 인가전압 변화라는 외란에 바이패스는 일정한 분사량으로 안정적인 특성을 나타내고 있다. 그러나 바이패스라는 추가적인 내부 유압 시스템이 부재한 경우, 전압 변동에 의한 영향을 상쇄시킬 수 없기에, 전장시스템의 불안정성이 증가할수록 직접적인 영향을 받을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 바이패스 방식 피에조 인젝터를 대상으로 피에조 적응 개수 및 인가전압 변화에 따른 인젝터의 구동 및 연료 분사 특성을 분석을 목표로 AMESim을 활용하여 수치해석을

수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바이패스 유무와 별개로, 밸브 변위는 스택증가에 비례적으로 반응하지만, 리턴되는 유량은 스택 수 450개 이상에서 영향이 없는 것을 알 수 있었다. 이는 노즐 직경 및 유효 내부 유동량의 한계로 인한 것으로 판단된다.

(2) 바이패스가 있는 경우, 없는 조건 대비 구동 초기 파일럿 밸브의 변위 및 리턴 유량의 구배는 인가전압의 변화보다 바이패스로 인한 내부 유량변화에 의한 영향이 지배적인 것에 기인한 것으로 판단된다.

(3) 인가전압의 일정값이 변동하는 상황에서도 바이패스 시스템의 내부 유압회로를 통하여 리턴 밸브의 변위에 영향을 받지 않고 안정적으로 일정한 분사가 가능함을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 강승우, 홍동우, 배충식, 소형 디젤 엔진의 인젝터 노즐 형상에 따른 연소 기간 및 연비 특성. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 2018, 191~191.
- (2) G. Bression, D. Soleri, S. Savy, S. Dehoux, D. Azoulay, H. B. Hamouda, L. Doradoux, N. Guerrassi and N. Lawrence, "A study of methods to lower HC and CO emissions in diesel HCCL," SAE 2008-01-0034, 2008.
- (3) j. Schommers, f. Duvinage, M. Stotz, A. Peter, S. Ellwanger, K. Koyanagi and H. Gildein, "Potential of common rail injection system for passenger Car DI diesel engines", SAE paper, No. 2000-01-0944, 2000.
- (4) N. Guerrassi and P. Dupraz, "A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines", SAE paper, No. 980803, 1988.
- (5) 이진우, 배충식, "인가전압이 디젤 피에조 인젝터의 분무 특성에 미치는 영향", Vol. 18, No. 4, pp. 99~106.
- (6) "A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards", ICCT, 2016.
- (7) J.-W. Lee and K.-D. 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, 2006, pp. 351~358.
- (8) 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.