

승용CRDi용 3세대 피에조 인젝터 유압해석모델 개발 및 검증

조인수¹⁾ · 정명철¹⁾ · 이진욱²⁾

승실대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 승실대학교 기계공학과²⁾

Verification and Hydraulic Model Development of 3rd Generation Piezo Injector for CRDi System in Passenger Vehicle

Insu Jo¹⁾ · Myoungchul Jeong¹⁾ · Jinwook Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 3 January 2013 / Revised 9 January 2013 / Accepted 14 January 2013)

Abstract : Performance of DI diesel engine with high fuel injection method is directly related to its emission characteristics and fuel consumption. In this study, numerical model of 3rd generation piezo-driven injector was designed to analyze the hydraulic performance. Also the injection response characteristics was investigated by using the AMESim simulation code. From this study, it was shown that 3rd generation piezo-driven injector had a faster response and had better control capability due to its hydraulic bypass-circuit that has potential to higher hydraulic characteristics and improved accuracy of injected fuel quantity.

Key words : Bypass-circuit(바이패스 회로), Piezo-driven injector(피에조 인젝터), CRDi(커먼레일 직접분사), Piezo indirect acting system(피에조 간접 작동시스템), Internal hydraulic modeling(내부 유압 모델링), Inverse piezo-electric effect(역압전효과), AMESim simulation code(AMESim 해석코드)

1. 서론

1.1 연구 배경

전 세계적인 에너지 및 경제위기, 지구온난화문제에 의해 친환경자동차의 개발 및 보급에 대한 수요가 점차 증가하고 있는 가운데, 가장 현실적인 대안으로 부각된 것이 클린디젤자동차이다.

1990년대 후반, 전자제어식 분배형 분사펌프와 전자식 인젝터의 사용으로 고정밀 분사를 실현한 디젤엔진이 등장하였고, 특히 커먼레일시스템 방식의 개발로 인해 엔진회전수와 관계없이 고압분사가 가능해져 배출가스, 동력성능, 소음·진동 등 여러 방면에서 성능이 향상되었다.¹⁾

디젤 엔진은 전체 공기연료 혼합비가 희박한 조건에서 작동하여 연소에 활용할 산소가 풍부하고, 연소실로 직접 분사한 연료가 공기와 혼합되는 영역에서 연소가 이루어지므로 엔진에서의 일산화탄소(CO)와 미연탄화수소(THC)의 배출이 가솔린 엔진보다 훨씬 적고, 질소산화물(NOx)도 비교적 적게 배출된다. 또한 디젤 엔진은 서로 Trade-off 관계인 NOx와 PM을 동시에 저감하면서 연비를 향상시키고 연소음도 개선하기 위해 연소시스템을 개선하고 최적화하는 것이 일차적으로 선행되어야 한다.

이를 위해 연료분사의 제어를 보다 정밀하고 세밀하게 할 수 있도록, 인젝터 작동방식이 솔레노이드(solenoid-driven)에서 피에조(piezo-driven) 방식으로 바꾸는 것이 최근의 개발 동향이다. 왜냐하면 연료분사의 응답성이 빨라지므로 이를 통해 배출가스

*Corresponding author, E-mail: immanuel@ssu.ac.kr

를 보다 저감할 수 있는 최적 연소조건을 실현하는데 유리하기 때문이다.²⁾

또한 커먼레일시스템에서 분사된 연료의 혼합기 형성에 큰 영향을 주는 분사 압력의 경우, 초기 1,350bar 수준의 1세대, 1,600bar 수준의 2세대 그리고 현재에는 1,800bar 수준의 3세대가 실용화되고 있다. 향후 보다 높은 2,000bar 이상의 초고압 분사 시스템이 개발될 예정인데, 이러한 초고압 분사는 연료의 미립화 성능을 더욱 향상시키고 엔진 출력 증대 및 유해배출물 저감에 획기적으로 기여할 것으로 예상된다.³⁾

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 첫째, 현재 승용 커먼레일 직접분사시스템에 사용 중인 1,800bar의 고압연료분사가 가능한 3세대 피에조 인젝터의 구동방식인 Piezo Indirect Acting 시스템 내부의 바이패스형 유압서보회로에 대한 수치해석 모델링을 개발하는 것이다.

둘째, 개발된 해석모델을 통한 이론적 결과를 실험데이터와의 비교·검증을 실시하고자 인젝터 과도작동 상태에 대한 내부 유압 동특성을 해석하였다. 이를 통해 고압분사를 기반으로 다양한 변수에 따른 3세대 피에조 인젝터의 내부 유압 동특성 및 바이패스의 영향을 해석하는 것이 최종 목적이다.

1.3 연구 방법

본 논문에서는 기존 인젝터에는 존재하지 않는 바이패스 유압회로를 내장한 3세대 피에조 인젝터의 유압해석모델을 개발하고 이의 유압 동특성을 해석하고자 AMESim 해석 환경하에서 연구를 수행하였다.

AMESim코드는 부품 및 시스템 설계의 초기단계 및 설계과정에서 성능검증과 성능향상을 위한 도구로 활용함으로써 설계 및 개발시간을 줄일 수 있고, 실제시스템의 검토단계에서도 설계 최적화와 성능 향상을 위한 유용한 도구로, 빠르고 정확하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 AMESim 코드는 세계적으로 많은 대학 및 연구기관과 산업체 등에서 유용하게 사용, 검증 되었으며, 세계 여러

나라의 자동차, 산업용 응용프로그램, 로봇공학, 항공학/항공우주산업, 세시 공학, 유체동력, 동력계 등과 같은 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다.⁴⁾

3세대 피에조 인젝터에 대한 극히 일부 국외연구를 제외하고 관련 국내연구는 전무한 상태이기에 본 연구에서는 3세대 피에조 인젝터의 내부 유압 동특성을 해석할 수 있도록 바이패스형 유압서보회로에 대한 수치해석 모델을 AMESim으로 개발하였다. 참고로 논문지면관계상 기존의 3-way형 피에조 인젝터와 본 연구대상인 3세대 피에조 인젝터의 동특성을 비교·해석결과는 후속 논문에서 별도로 자세히 기술할 것임을 미리 밝히고자 한다.

2. 3세대 피에조 인젝터용 해석모델 개발

2.1 피에조 액추에이터의 구동 개념

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 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 역압전효과(inverse piezoelectric effect)라 한다.⁵⁾

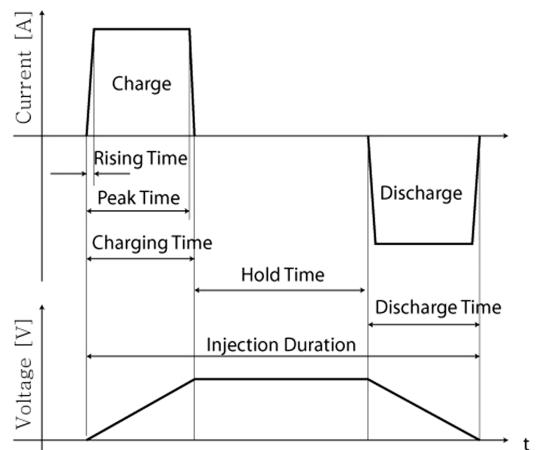


Fig. 1 Driving current wave of piezo injectors

2.2 3세대 피에조 인젝터 실물

본 연구의 수치 해석 모델 개발을 위하여 피에조 액추에이터와 내부 니들 구동부를 가지는 상용 3세대 피에조 인젝터(Bosch사)를 대상으로 선정하였다. 본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 피에조 인젝터의 분해 사진으로, 3세대 피에조 인젝터의 모델을 개발하기 전에 실제 인젝터의 내부 구조를 확인하였다. 피에조 액추에이터 구동으로 파일럿 밸브 변위가 발생하고 연료 분사가 이루어지는 과정에서 주요한 영향을 주는 Fig. 2내 별도로 점선 표시된 부분과 인젝터 내부로 고압연료를 공급하는 라인으로 모델범위를 정하였다. Fig. 2내 별도로 표시된 부품은 (1)파일럿 밸브, (2)바이패스, (3)컨트롤 챔버, (4)딜리버리 챔버, (5)니들이다.

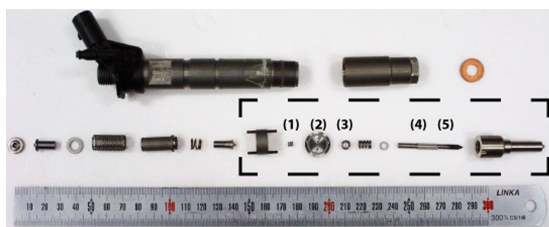


Fig. 2 Component 5 display of 3rd generation piezo injector

2.3 3세대 피에조 인젝터의 연료분사 원리

고압의 연료는 인젝터 내부의 fuel inlet을 통하여 컨트롤 챔버, 딜리버리 챔버, 바이패스, 니들 주변, 각 노즐로 구성된 인젝터 내부를 일정한 압력으로 유지할 수 있도록 공급된다.

이 중에서 컨트롤 챔버는 Fig. 3에서 보듯이, 니들 상단에 위치하며 파일럿 밸브 및 바이패스와 각각 연결되어 있다. 딜리버리 챔버는 니들 중간에 위치하며 바이패스와 연결되어 있는데 특정 조건에 따라 컨트롤 챔버와의 연료 유동이 가능하다.

앞서 언급한대로, 피에조 인젝터는 피에조 액추에이터에 전류가 인가되어 변형으로 발생하는 구동력으로 분사가 이루어진다. 본 연구의 해석 대상인 3세대 피에조 인젝터의 경우, 연료분사시 피에조 소자의 팽창으로 파일럿 밸브가 열리는 방식이다.

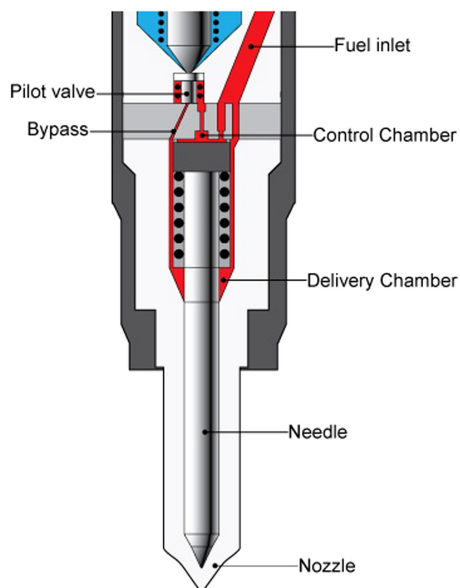


Fig. 3 Internal structure of 3rd generation piezo injector

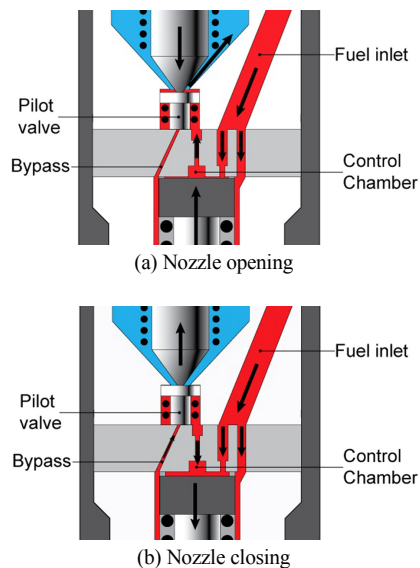


Fig. 4 Nozzle opening/closing stage of piezo injector

Fig. 4의 (a)와 같이 피에조 액추에이터가 팽창되어 파일럿 밸브가 열리게 되면 컨트롤 챔버 내부의 연료가 리턴 된다. 파일럿 밸브는 바이패스 라인에 연료유동을 제어하는 하나의 ‘밸브’ 역할을 하는데, 피에조 액추에이터 구동으로 파일럿 밸브가 열려 리턴되는 연료는 유동이 가능하지만 바이패스 라인은 닫힌다. 이때 낮아진 컨트롤 챔버 내부 압력으로

니들 변위가 발생하며 인젝터 하단의 노즐을 통해 고압의 연료가 분사된다.

반면, Fig. 4의 (b)와 같이 피에조 액추에이터가 수축되어 파일럿 밸브가 닫히게 되면 컨트롤 챔버 내부 연료의 리턴은 종료된다. 바이패스를 막고 있던 파일럿 밸브의 이동으로 딜리버리 챔버에서 컨트롤 챔버로의 연료유동이 발생한다. 결국 fuel inlet과 바이패스 라인을 통하여 고압의 연료가 컨트롤 챔버 내부를 채우게 되고, 니들은 노즐을 닫아 연료분사가 종료된다.

2.4 3세대 피에조 인젝터 모델링

이와 같은 구동원리를 갖는 피에조 인젝터의 유압회로를 AMESim code로 모델링하기 위하여 Fig. 5와 같은 유압 회로도를 먼저 작성하였다. 본 회로도 는 인젝터 내부 연료 압력차이로 구동되는 인젝터 특성상 화살표로 고압연료의 흐름을 중점적으로 나타내었다. 컨트롤 챔버와 딜리버리 챔버 사이에 위치한 니들의 경우, 구조적 형상 및 치수와 관련되어 있기 때문에 인젝터 초기 구동에 영향을 주는 피에조 스택과 파일럿 밸브만을 표시하였다.

고압연료는 기본적으로 fuel inlet으로 유입되어 화살표 방향으로 이동하며, 파일럿 밸브와 컨트롤 챔버의 유동은 특정 조건에 따라서 유동 방향이 변하게 된다.

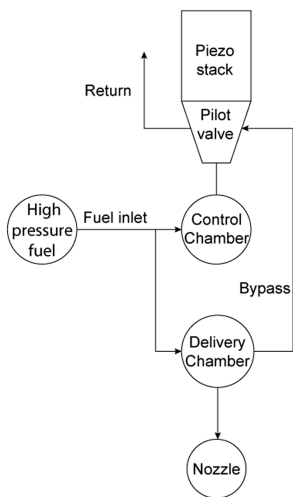


Fig. 5 Flow chart showing hydraulic circuit system of piezo injector

Fig. 6은 Fig. 5의 개념을 기반으로 AMESim 수치 해석 코드를 이용하여 개발한 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 밸브 형상에 따른 영향은 무시할 수 있기 때문에 원형 밸브를 사용하였다. 파일럿 밸브와 바이패스가 연결된 부분에 플래퍼 밸브를 추가하였는데, 이는 파일럿 밸브의 변위에 따른 바이패스로의 연료유동을 모델링한 것이다.

니들과 플러저는 인젝터 내부 벽면과 마찰 및 점

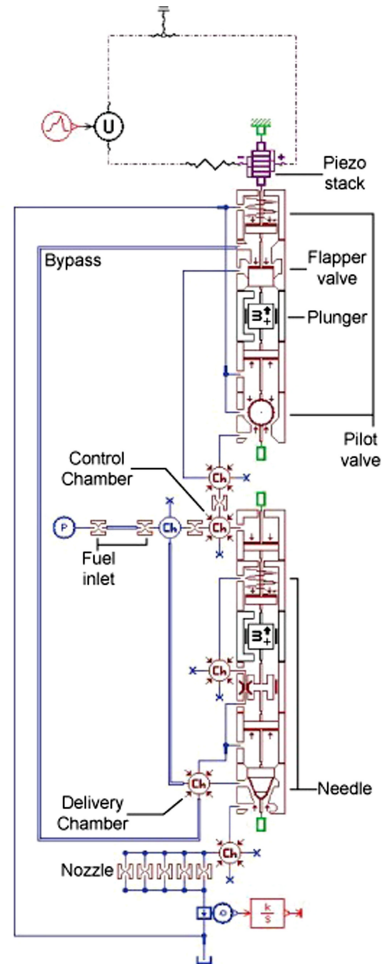

















Fig. 6 AMESim model corresponding to piezo injector's internal structure

Table 1 Essential elements list of piezo injector mode in AMESim environment

	piecwise 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
	piecwise linear hydraulic pressure source
	leakage and viscous friction
	poppet with conical seat
	hydraulic flow rate sensor with offset and gain
	integrator

성의 영향을 고려하여 점성·마찰 요소가 필요하며, 질량을 고려하여 질량 모델을 추가 하였다.

컨트롤 챔버는 니들 변위에 따라 체적이 변하는 특징을 갖기 때문에 니들 상단에 피스톤과 챔버 요소의 조합으로 구성하였다.

딜리버리 챔버는 니들에 위치하고 바이패스와도 직접 연결되어있는 것을 고려하여 모델링 하였다.

노즐은 입구과 출구가 동일한 오리피스 요소를 5개 병렬 연결하였으며, 분사 후 하나의 라인을 통하여 유량 센서를 지나게 되어 분사량을 측정 할 수 있게 구성되었다. 유량 센서 오른쪽에 위치한 적분기로 시간에 따른 누적 분사량도 확인할 수 있다.

이상 기술한 3세대 피에조 인젝터의 내부 유압해

석을 위해 인젝터 모델에 사용된 AMESim 주요 모델 요소를 Table 1에 요약 정리하였다. 즉, 본 연구에서 이런 가장 기본 단위 모델의 조합으로 인젝터 모델을 구성한 것이다.

3. 해석결과

3.1 개발된 해석모델 검증

본 연구에서 개발한 해석모델은 참고문헌⁶⁾에서 인용한 3세대 피에조 인젝터의 실제 실험 데이터 자료와의 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다. 먼저 Fig. 4의 fuel inlet의 압력변동, 연료 분사율 그리고 인가전류의 경향성을 비교하였다. 실험 조건과 동일한 구동 조건으로 energizing time (스택의 방전 전까지의 시간)은 800 μ s이며, 연료압력은 1000 bar로 모델 해석을 수행하여 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 압력변동의 경우 유사한 패턴을 보였으며, 분사율의 적분량은 실험결과보다 다소 적지만, 최대 분사율(3.0L/min)은 거의 일치하는 경향성을 가짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 3세대 피에조 인젝터 컨트롤 챔버 내부 압력변화를 바이패스 유무에 따라 수치 해석한 결과를 나타낸 것이다. 바이패스라인이 있을 때(실선)와 없을 때(점선)의 응답성을 비교해 보면, 최대 압력강하 값이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 9는 3세대 피에조 인젝터의 딜리버리 챔버 내부 압력변화의 수치해석 결과를 비교한 것이다. 압력변동 값의 최대·최소값과 및 전체적인 경향성이 일치함을 확인하였다.

Fig. 10은 3세대 피에조 인젝터의 A 오리피스, Z 오리피스, 바이패스에서 분사량을 나타낸 것이다. Z오리피스는 fuel inlet과 컨트롤 챔버 사이에 위치하며, A 오리피스는 컨트롤 챔버에서 파일럿 밸브 중간에 위치한다. Z 오리피스의 경우 상대적으로 큰 압력강하가 발생으로 인한 약간의 오차를 제외하고, 각 오리피스와 바이패스에서 분사량의 경향이 일치함을 확인하였다.

3.2 분사율 특성 평가

본 연구에서는 Table 2의 Parameter의 기본 값으로 3세대 피에조 인젝터(Bypass 유·무)의 유압 해석

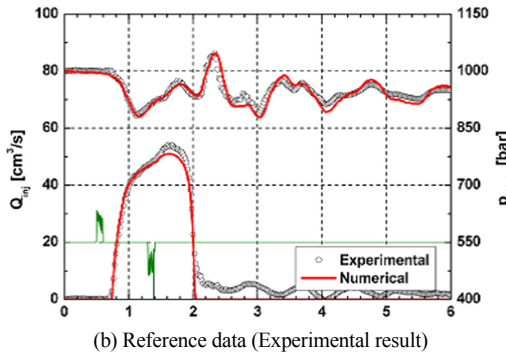
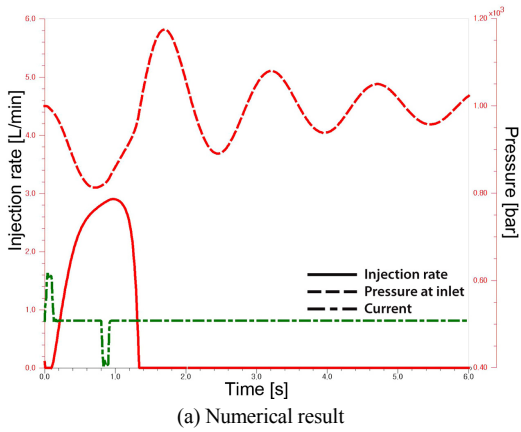


Fig. 7 Verification of new analytic model with experimental result(6)

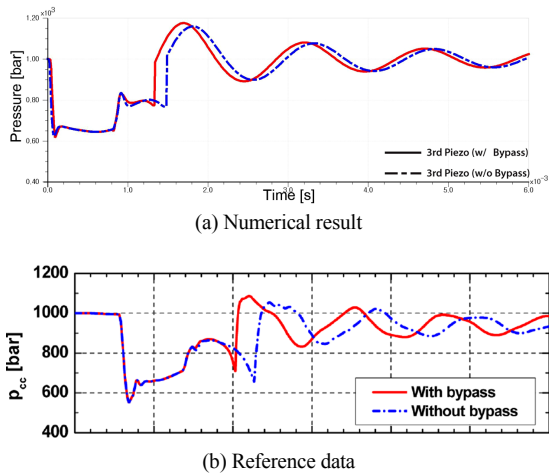
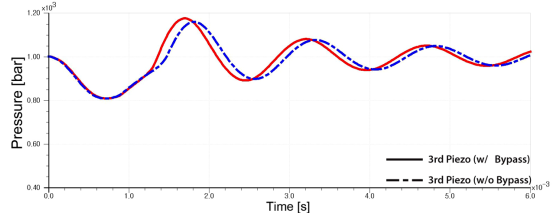


Fig. 8 Verification of new analytic model at control chamber
을 수행하였다.

피에조 인젝터는 컨트롤 챔버와 딜리버리 챔버내 부 압력 차이에 의한 니들 변위 발생으로 분사가 이



(a) Numerical result

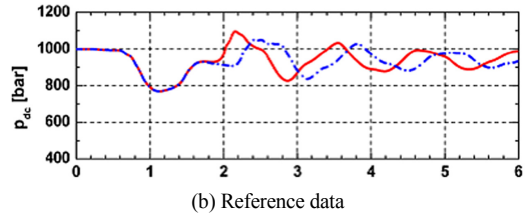
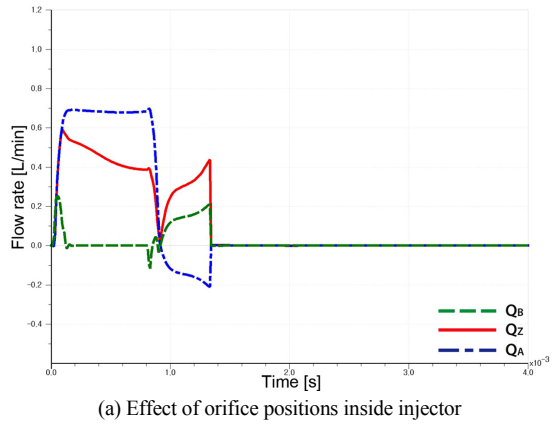


Fig. 9 Verification of new analytic model at delivery chamber



(a) Effect of orifice positions inside injector

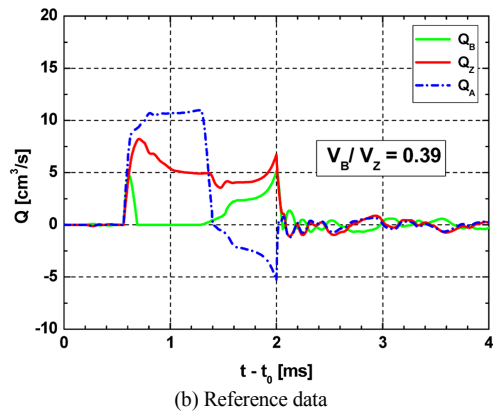


Fig. 10 Verification of new analytic model about flow rate on A nozzle, Z nozzle and Bypass

루어지기 때문에 해석을 위한 결과값으로 연료 분사율 및 컨트롤 챔버, 딜리버리 챔버 압력 값은 인젝

Table 2 Numerical conditions

	w/ Bypass	w/o Bypass
Fuel pressure (bar)	1000	
Atmospheric pressure (bar)	1	
Injection duration(μs)	800	

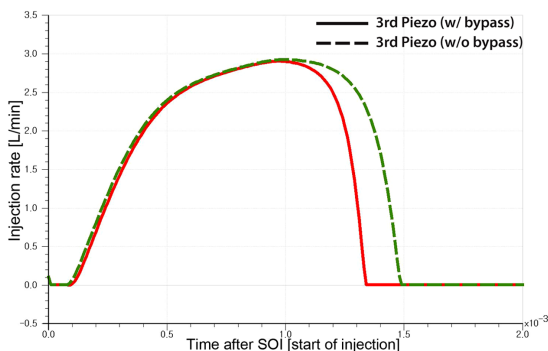


Fig. 11 Comparison of injection rate

터 내부 동특성 차이를 파악하는 지표가 된다. 따라서 본 연구에서는 연료 분사율로 인젝터 기본 특성을 평가하였다.

Fig. 11은 3세대 피에조 인젝터 내부의 Bypass 유·무에 따른, 분사율 변화를 나타낸 것이다.

3세대 피에조 인젝터의 분사율은 비 대칭적 형상을 보이며 최대 분사율은 한 지점에서 일시적으로 나타남을 알 수 있었다. 또한 3세대 피에조의 경우, 바이패스 유·무에 따른 분사 종료 시점의 차이는 바이패스 회로가 있는 경우, 상대적으로 0.15 ms 빠른 분사종료를 보였다(참고: 바이패스가 존재할 때, 약 1.35 ms, 존재하지 않을 때 약 1.5 ms). 이는 분사 종료 기간, 즉 피에조 소자의 수축으로 파일럿 밸브가 닫히는 과정으로 바이패스를 통한 컨트롤 챔버 내부로 추가적인 고압 연료 충전에 기인한 것으로, 인젝터 구동 응답성이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 바이패스 유·무에 따른 최대 분사량 값은 유사함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 현재 승용 커먼레일 직접분사 시스템에 사용 중인 3세대 피에조 인젝터 유압 구동방식인 Piezo Indirect Acting FIE에 대해, 내부 유압서보회로에 대한 수치해석 모델링을 개발하고 실험 데이터

자료를 통한 검증으로 신뢰도를 확보하고자 수행하였다. 특히, 3세대 피에조의 구동 특성과 바이패스 유·무에 따른 영향을 비교 분석한 것으로, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 3세대 피에조 구동 방식 인젝터의 내부 구조 및 유동흐름을 파악하여 AMESim 수치 모델을 개발하였으며, 실험 데이터 및 해석 데이터와의 상호 비교 결과, 해석 모델의 신뢰성을 검증할 수 있었다.
- 2) 특히 기존 2세대 인젝터에 존재하지 않은 바이패스 유압회로 해석결과, 분사 종료 시 컨트롤 챔버의 압력 회복시간이 단축되어 이들의 빠른 응답성에 영향을 미치는 것을 딜리버리 챔버와 컨트롤 챔버의 연료압력변동으로 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차 기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) National Institute of Environmental Research, Forecast and Present Condition of Clean Diesel Vehicle, 11-1480523-000505-01, 2009.
- 2) K. Min and H. Choi, "The Emission Reduction Technology Trend of Clean Diesel Engines," Auto Journal, KSAE, Vol.31, No.5, pp.33-39, 2009.
- 3) Y. Kim and S. Cho, "New Technologies for the Super Clean Passenger Car Diesel Engines," Auto Journal, KSAE, Vol.31, No.5, pp.16-24, 2009.
- 4) Y. H. Yoon, "Introduction to AMESim Software," KEPS, Vol.2, No.1, pp.3-9, 2005.
- 5) 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, pp.351-358, 2006.
- 6) 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.