

3-way형과 Bypass형 서보유압 피에조 인젝터의 구동특성 비교

조인수¹⁾ · 정명철¹⁾ · 이진욱²⁾

승실대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 승실대학교 기계공학과²⁾

Comparison Analysis of Dynamic Characteristics of Servo-hydraulic Piezo-driven Injector between 3-way and Bypass-circuit Type

Insu Jo¹⁾ · Myoungchul Jeong¹⁾ · Jinwook Lee^{*2)}

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 28 January 2013 / Revised 7 February 2013 / Accepted 7 February 2013)

Abstract : CRDi technology of diesel engine was developed from in the early 2000s due to a need to increase fuel efficiency and environment care. Especially, high-pressure fuel injection system in CRDi system which has a fuel injection unit including an injector, a fuel pump and common-rail, etc. becomes possible to make the exhaust gas clean as well as power improvement. In this study, comparison of dynamic characteristics of servo-hydraulic piezo-driven injector with 3-way and bypass-circuit type was analyzed by using the AMESim code. As results of this study, it found the bypass-circuit inside servo-hydraulic piezo injector can cause a faster injection response than that of the 3-way type. Also it was shown that bypass-circuit type had better control capability due to hydraulic bypass system.

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

하이브리드차와 함께 현실적 친환경차인 클린디젤은 최근 유럽에서 각광받고 있는데, 이는 저연비와 함께 유럽 환경규제 유로-V와 미국 연방 환경규제인 Tier-II/Bin5를 만족할 수준의 청정도를 가지는 장점이 있기 때문이다. 특히 글로벌 자동차부품업체인 보쉬(Bosch)에서는 클린디젤차의 세계시장 점유율이 2014년 약 30%까지 확대될 것으로 전망하고 있다.¹⁾

이러한 클린디젤의 연소시스템 기술로는 NOx와 PM을 동시에 저감시킬 수 있는 것으로 알려진 예혼

합 압축착화(HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) 및 저온연소(LTC, Low Temperature Combustion)기술 등이 있다. 특히 이의 실현을 위한 요소기술로는 고압시스템과 다단분사 가능한 고압 연료분사시스템, 냉각 및 윤활시스템 개선, 흡기유동 및 피스톤 보울 최적화, 가변 밸브기술(VVA, Variable Valve Actuation)과 가변연소실기술 그리고 과급(turbocharging)과 배기재순환(EGR; Exhaust Gas Recirculation) 기술 등이 있다. 이 중에서 현재 국산 경유차량에 장착되는 직접분사 인젝터의 경우, 전량 수입에 의존 하고 있는 실정이다.²⁾

따라서 국제적인 경쟁력을 확보해 나가고 있는 자동차산업의 현재 추세를 잘 이어가기 위해서는 국내 연구 인프라를 확충하고 기술개발인력의 양성

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

과 원천기술의 확보에 집중할 필요가 있다.³⁾

즉, 승용디젤엔진의 발전에 주된 역할을 담당하는 고압연료분사시스템의 경우, 연소개선을 통한 성능 향상에 직접적인 기능을 수행한다. 솔레노이드 방식의 커먼레일 고압인젝터는 보다 정밀한 제어를 위하여 피에조 타입의 인젝터로 진화하였고, 분사 연료의 혼합기 형성에 큰 영향을 주는 분사 압력의 경우에도 초기 1,350bar 수준의 1세대, 1,600bar 수준의 2세대 그리고 현재에는 1,800bar 수준의 3세대시스템이 보편화되고 있다. 이러한 고압분사는 연료의 미립화 성능을 더욱 향상되고 엔진 출력 증대에 기여할 뿐만 아니라 궁극적으로 매연과 같은 유해배출물 발생 저감에도 도움이 된다.⁴⁾

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 고압연료분사가 가능한 현재 승용 커먼레일 직접분사 시스템에 사용 중인 피에조 인젝터 유압 구동방식인 Piezo Indirect Acting FIE에 대해, 3-way 방식과 bypass형 유압방식별로 피에조 인젝터 내부의 과도작동 상태에 대한 유압 동특성을 비교 해석하고자 함이다. 특히 고압분사를 기반으로 다양한 변수에 따른 피에조 인젝터의 구동 특성을 분석하는 것이 최종 목적이다.

1.3 연구 방법

본 연구에서는 AMESim 상용 코드로 개발된 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터 모델을 통하여 상호 구동 특성을 비교하고자, 해석변수를 적용하여 수행하였다.

AMESim코드는 부품 및 시스템 설계의 초기단계 및 설계과정에서 성능검증과 성능향상을 위한 도구로 활용함으로써 설계 및 개발시간을 줄일 수 있고, 실제시스템의 검토단계에서도 설계 최적화와 성능향상을 위한 유용한 도구로써, 빠르고 정확하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 세계 여러 나라의 자동차, 산업용 응용프로그램, 로봇공학, 항공학/항공우주산업, 새시 공학, 유체동력, 동력계 등과 같은 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다.⁵⁾

본 논문은 참고문헌⁶⁾의 실험 자료와 bypass형 피에조 인젝터 수치모델의 검증자료(논문명: 승용

CRDi용 3세대 피에조 인젝터 유압해석모델 개발 및 검증)를 통해 해석 신뢰성을 확보한 후, 진행하였음을 미리 밝히고자 한다.

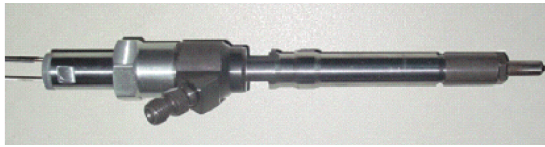
2. 3-way형 및 Bypass형 피에조 인젝터 해석모델 비교

본 연구에서의 수치 해석 모델 개발 대상은 피에조 액추에이터와 내부 유압회로를 통해 니들 구동부를 가지는 상용 피에조 인젝터를 기반으로 하였다. 피에조 인젝터는 피에조 소자에 전기를 인가하여 역압전 효과를 발생시키고, 이때 발생하는 구동력을 이용하여 니들 구동이 이루어져 연료를 분사하게 된다. 본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단열 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다.

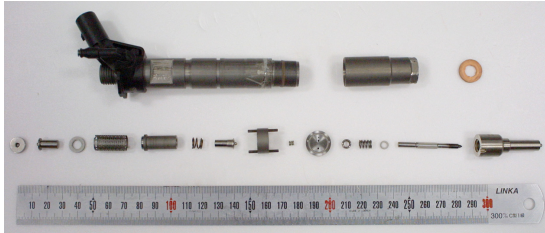
Fig. 1의 (a)와 (b)는 3-way형 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 실물사진이며, Fig. 1의 (c)와 (d)는 각 피에조 인젝터의 유압회로를 나타낸 내부 구조도이다. 이러한 인젝터의 내부 메커니즘의 이해를 통하여 실물과 동일하도록 수치해석 모델을 개발하였다.

유압해석을 위해 개발된 3-way형 및 bypass형 피에조 인젝터의 해석모델을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 3-way 유압회로로 구동되는 인젝터 모델로써, 피에조 액추에이터의 구동으로 Pilot ball valve가 열리면 Control chamber (1) 내부의 연료가 리턴되고 Delivery chamber (2) 대비 상대적으로 낮은 압력으로 인해, 아래쪽 니들이 들려져서 노즐로 연료가 분사되는 방식이다.

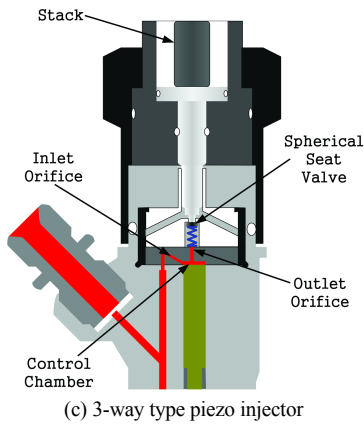
Fig. 2(b)의 모델은 bypass 유압회로를 가지는 피에조 인젝터의 해석모델을 나타낸 것이다. 이 또한 Control chamber (1)와 Delivery chamber (2)의 내부 압력 차이로 니들을 구동하여 분사하는 방식이지만, Pilot valve의 위치에 따라 추가로 고압연료가 이동할 수 있는 Control chamber (1)와 Delivery chamber (2)가 연결된 bypass회로를 별도로 구비하고 있는 특징이 있다. 즉, 피에조 액추에이터가 구동되고 Pilot valve가 아래로 이동해 열리면 고압연료가 리턴되고 bypass는 닫히게 되며, Pilot valve가 위로 이동해 연료리턴이 중단되면 bypass는 열리게 된다. 이때,



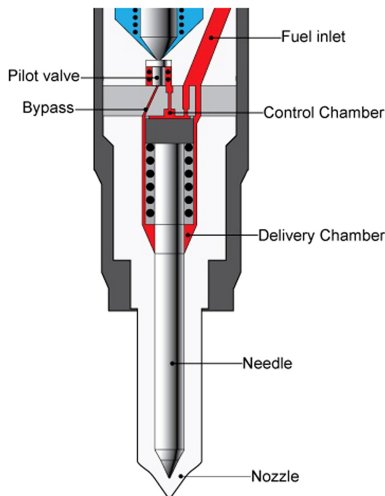
(a) 3-way type piezo injector (실물)



(b) Bypass type piezo injector (실물)



(c) 3-way type piezo injector



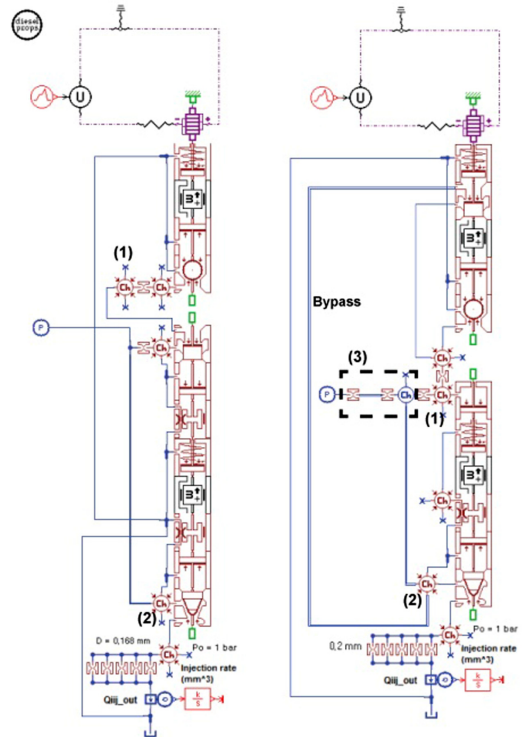
(d) Bypass type piezo injector

Fig. 1 Layout of internal structure and control chamber of a piezo-driven injector between 3-way and bypass-circuit type

bypass가 열리면 Control chamber(1)로 커먼레일에서 직접 유입되는 라인과 Delivery chamber (2)를 경유하는 bypass라인 두 곳에서 고압의 연료가 공급되는 방식이다.

Fig. 3은 Fig. 2(a)의 3-way형 피에조 인젝터와 Fig. 2(b)의 bypass형 피에조 인젝터의 해석모델을 대상으로, 분사압력 1000 bar, 분사기간 800 μ s 조건하에서 분사율에 대한 해석결과를 비교해서 나타낸 것이다. 최대 분사량은 두 인젝터의 고유특성으로 직접비교는 어렵지만 Fig. 3내 별도로 표시된 bypass형 피에조 인젝터의 분사율은 비대칭적인 형상을 보이는데, 이것은 Control chamber (1)와 커먼레일의 연결부를 모델링한 Fig. 2(3)의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 해석인자의 기본값을 사용하여 3-way 방식과 bypass형 피에조 인젝터(Bypass 유·무)의 유압해석을 수행하였다. 이론해석수행 후, 결과 분석시에는 주로 분사율과 Control



(a) 3-way type

(b) Bypass type

Fig. 2 Analytic model of piezo injector between 3-way and bypass-circuit type

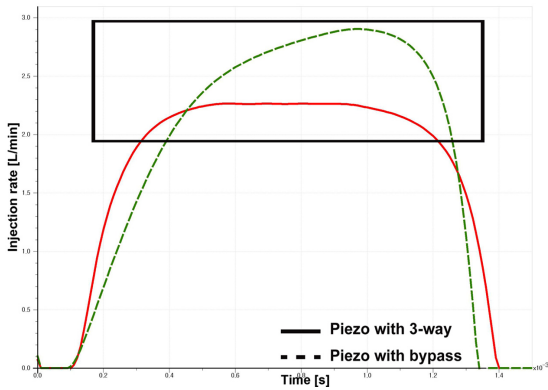


Fig. 3 Comparison of injection rate between 3-way and bypass-circuit type piezo injector

Table 1 Numerical conditions

형식	3-way type		Bypass type
연료압(bar)	1000	1400	1800
분공경(mm)	0.15	0.2	0.25
Injection duration(μ s)	800		
Nozzle diameter(mm)	0.2		

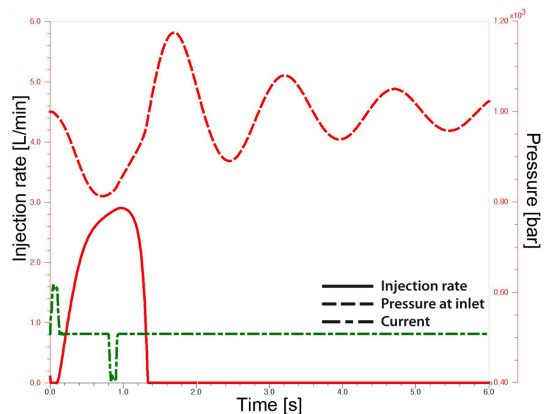
chamber (1) 그리고 Delivery chamber (2)의 압력값을 사용하였다. 왜냐하면 Control chamber와 Delivery chamber 내부 압력 차이에 의한 니들 변위 발생으로 연료분사가 이루어지기, 서로 다른 유압방식을 가지는 피에조 인젝터 내부 동특성 차이를 파악하는데 중요한 지표가 되기 때문이다.

3. 해석결과

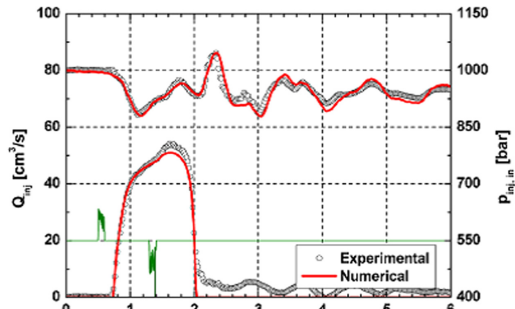
Fig. 4는 앞서 언급한 참고문헌⁶⁾에서 인용한 3세대 피에조 인젝터의 실제 실험 데이터 자료와의 비교검증 자료이다. 실험 조건과 동일한 구동 조건으로 energizing time(스택의 방전 전까지의 시간)은 800 μ s이며, 연료압력은 1000 bar로 모델 해석을 수행하였다. 압력변동의 경우 유사한 패턴을 보였으며, 최대 분사율(3.0L/min) 및 분사시간이 근소한 오차로 매우 일치함을 확인할 수 있었다.

3.1 노즐 분공경별 영향

Fig. 5는 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 분사압력 1000 bar, 분사 hole의 직경이 0.15, 0.2, 0.25 mm 일 때, delivery chamber 내부 압



(a) Numerical result

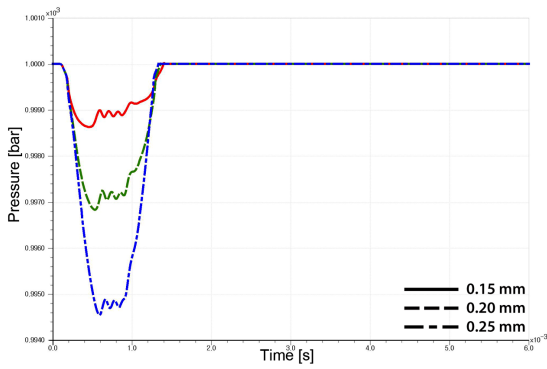


(b) Reference data(Experimental Result)

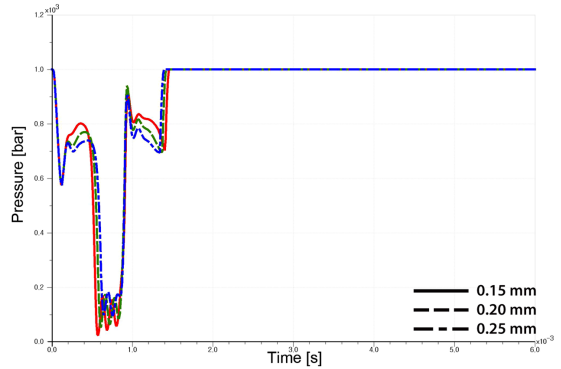
Fig. 4 Verification of new analytic model with experimental result⁶⁾

력 변화를 나타낸 것이다. 분공경 변화에 따른 압력강하 패턴은 확연히 차이가 있는데, 3-way 방식의 경우 분공경 변화에 따라 압력강하의 크기가 일정한 비율로 낮아짐을 알 수 있었다.

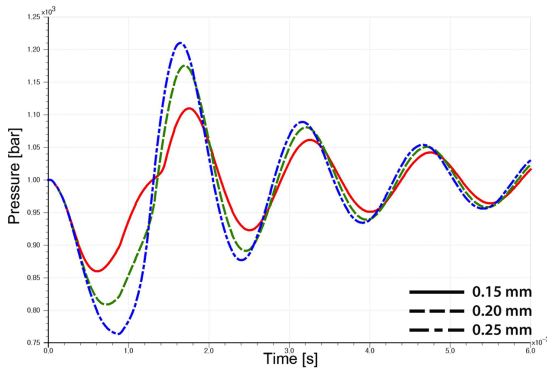
Fig. 6은 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 분사압력 1000 bar, 분사 hole의 직경이 0.15, 0.2, 0.25 mm 일 때, control chamber 내부 압력 변화를 나타낸 것이다. 3-way 피에조 인젝터의 경우 노즐증가에 따라 최대 압력강하가 나타나는 시점이 지연되며, 노즐 변화에 따른 최대 압력강하 값에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 하지만 bypass형 피에조 인젝터의 경우 분공경 증가로 압력강하 폭이 점차 크게 발생된다. 분공경 증가로 압력회복이 빨라지는 특성은 delivery chamber 내부 압력강하가 더 크게 발생되고 결국 control chamber와의 더 커진 압력차이로 니들종료시간이 단축되어 챔버 내부로 연료유입이 빨라지기 때문으로 판단되며, 이는



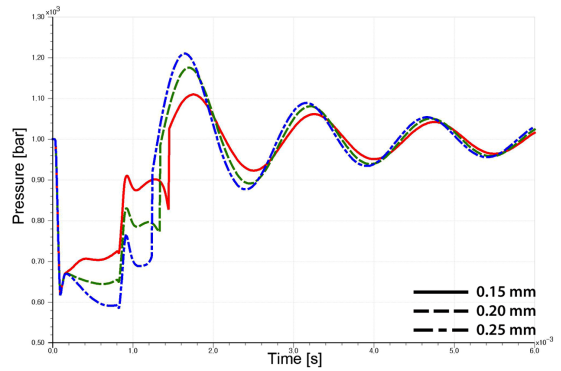
(a) 3-way type



(a) 3-way type



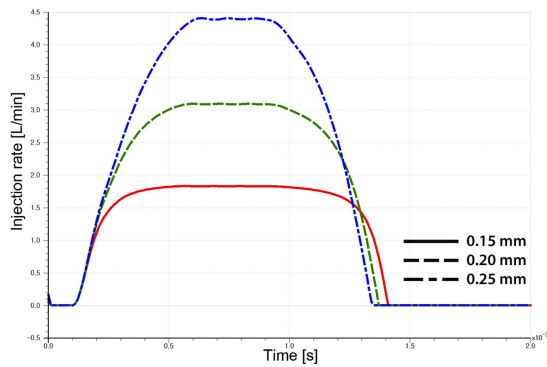
(b) Bypass-circuit type



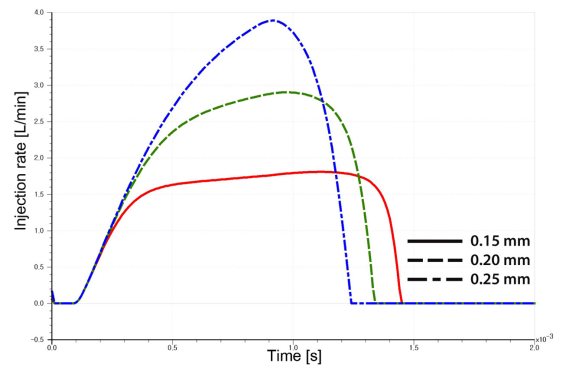
(b) Bypass-circuit type

Fig. 5 Effect of injection hole diameter on pressure at delivery chamber of 3-way and bypass type piezo injector

Fig. 6 Effect of injection hole diameter on pressure at control chamber of 3-way and bypass type piezo injector



(a) 3-way type



(b) Bypass-circuit type

Fig. 7 Effect of injection hole diameter on injection rate of 3-way and bypass type piezo injector

3-way 모델과 동일한 경향을 나타낸다.

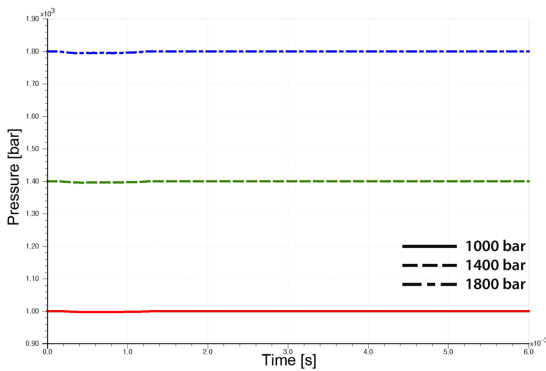
Fig. 7은 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 분사압력 1000 bar, 분사 hole의 직경이 0.15, 0.2, 0.25 mm 일 때, 분사율을 나타낸 것이

다. bypass형 피에조 인젝터의 경우 분공경 증가로 3-way 피에조 인젝터 대비 빠른 분사 종료율을 보이며, 분공경 직경의 변화에 따른 분사 종료의 시간 간격 차이 역시 증가함을 알 수 있다. 이로부터 bypass

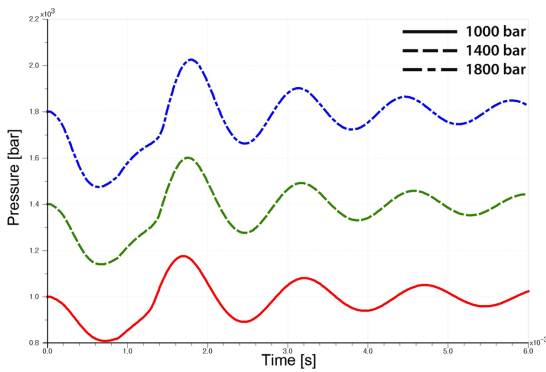
형 피에조의 경우, 분공경 변화에 따른 내부 압력 변화의 민감성이 높은 것으로 판단할 수 있었다.

3.2 연료압력별 영향

Fig. 8은 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 노즐 분공경 0.2 mm, 연료압력이 1000, 1400, 1800 bar 일 때, delivery chamber 내부 압력 변화를 나타낸 것이다. 3-way 피에조 인젝터의 경우 고압의 연료의 노즐부로의 유동으로 미소한 압력강하가 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 7(a)에 나타낸 각각의 그래프는 Fig. 4(a)와 같은 변동을 보이지만, 변수로 주어진 압력 스케일이 챔버내부 압력 변동 대비 상대적으로 크기에, 압력 변화가 없는 것으로 보일 뿐이다. 반면, bypass형 피에조 인젝터의 경우 bypass 라인으로 연료유동이 일정량 발생하기 때문에 압력 변동이 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있었다.



(a) 3-way type

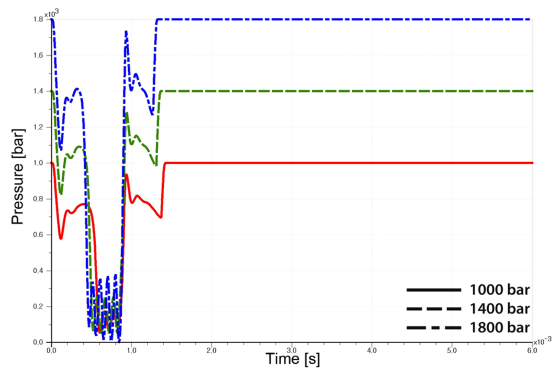


(b) Bypass-circuit type

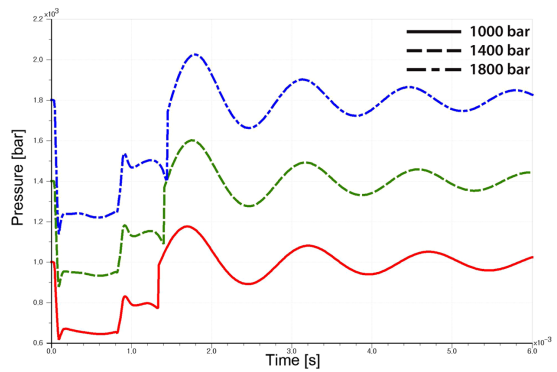
Fig. 8 Pressure variation at delivery chamber of 3-way and bypass type piezo injector

Fig. 9는 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 노즐 분공경 0.2 mm, 연료압력이 1000, 1400, 1800 bar 일 때, control chamber 내부 압력 변화를 나타낸 것이다. bypass형 피에조 인젝터의 경우 연료압력이 높을수록 연료압력이 낮을 때 보다 압력강하의 값이 증가하였으며, 최대 압력강하는 3-way 피에조 인젝터와 달리 일정값에 도달하지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 3-way 방식 피에조 인젝터와 bypass형 피에조 인젝터의 노즐 분공경 0.2 mm, 연료압력이 1000, 1400, 1800 bar 일 때, 분사율을 나타낸 것이다. 3-way 피에조 인젝터의 분사율은 압력증가에 따라 최대 분사율은 증가하고, 종료시간은 감소하는 경향을 보이는 반면, bypass형 피에조 인젝터의 경우 최대 분사율이 증가와 함께 분사종료 시점 또한 길어진 것을 알 수 있었다.



(a) 3-way type



(b) Bypass-circuit type

Fig. 9 Pressure variation at control chamber of 3-way and bypass type piezo injector

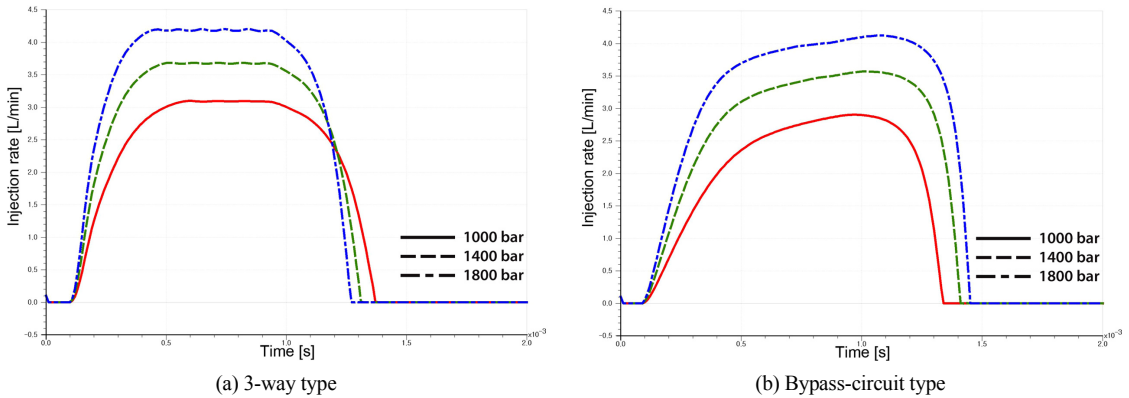


Fig. 10 Effect of Pressure variation on injection rate of 3-way and bypass type piezo injector

4. 결론

본 연구는 현재 승용 커먼레일 직접분사 시스템에 주로 사용 중인 bypass형 피에조 인젝터 유압 구동방식인 Piezo Indirect Acting FIE에 대해, 기존 3-way 방식 피에조 인젝터와 내부 유압특성을 비교 해석하고자 수행하였다. 특히 고압분사를 기반으로 다양한 변수에 따른 피에조 인젝터 내부 동적 특성을 분석한 것으로, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 분공경의 증가 시, bypass형 피에조 인젝터의 경우 delivery chamber에서 상대적으로 일정한 비율의 압력강하를 보였으며, control chamber의 압력강하 폭이 점차 크게 발생하였다. 분공경 증가로 bypass형 인젝터에서 상대적으로 더 큰 압력회복 및 분사 종료의 시간 간격 차이를 보였다. 이를 통해 bypass형 피에조의 경우, 분공경 변화에 따른 내부 압력변화의 민감성이 높음을 알 수 있었다.
- 2) 연료압력의 증가 시, bypass형 피에조 인젝터의 경우 bypass 라인으로 연료유동이 일정량 발생하기 때문에 3-way 피에조 대비 압력 변동이 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있었다. bypass형 피에조 인젝터의 경우 연료압력의 증가로 control chamber의 압력강하 역시 증가하였으며, 최대 압력강하는 3-way 피에조 인젝터와 달리 일정값에 도달하지 않음을 알 수 있었다.
- 3) 또한 연료압력의 증가 시, 3-way 피에조 인젝터 최대 분사율은 증가하고, 종료시간은 감소하는 경향을 보이는 반면, bypass형 피에조 인젝터의 경우 최대 분사율이 증가와 함께 분사종료 시점

또한 길어짐을 알 수 있었다.

후 기

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

References

- 1) T. Y. Kim, Future of the Automotive Industry: Green Car Status and Prospects, FKI Report(II), 2009.
- 2) National Institute of Environmental Research, Forecast and Present Condition of Clean Diesel Vehicle, 11-1480523-000505-01, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Y. H. Yoon, "Introduction to AMESim Software," KEPS, Vol.2, No.1, pp.3-9, 2005.
- 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.