

AMESim기반 피에조 인젝터용 해석모델의 민감도 특성 해석

조인수¹⁾ · 권지원¹⁾ · 이진욱²⁾

송실대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 송실대학교 기계공학과²⁾

Analysis of Sensitivity Characteristics with AMESim Model for Piezo Injector

Insu Jo¹⁾ · Jiwon Kwon¹⁾ · 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 26 January 2012 / Revised 10 July 2012 / Accepted 16 July 2012)

Abstract : Performance of DI diesel engine with high fuel injection method is directly related to the emission characteristics and fuel consumption. At present, diesel injection system with piezo element is replacing conventional solenoid type due to their faster electro-mechanical properties. In this study, it was investigated the sensitivity characteristics regarding internal hydraulic modeling based on the AMESim environment of piezo-driven injector. The analytic parameter for this study defined such as In/Out orifice, injection hole's diameter and driven voltage on piezo stack. As the results, it was shown that these parameter influence on a fast response characteristics of piezo-driven injector. Also we found fuel pressure recovery time is faster about 0.1 ms due to larger IN orifice diameter. And larger OUT orifice diameter occurs maximum pressure drop with faster its timing of about 0.2 ms.

Key words : Piezo-driven injector(피에조 인젝터), Inverse piezo-electric effect(역압전효과), AMESim simulation code(AMESim 해석 코드), CRDi Injector(커먼레일 직접분사용 인젝터)

1. 서론

전자식 유닛인젝터(Electronic Unit Injector, EUI)은 분사 밸브와 제어 솔레노이드를 인젝터 장치 내부로 통합함으로써, 부품 소형화 및 연료의 유동 경로를 단축할 수 있어 분사응답성 향상을 유도할 수 있다. 하지만 커먼레일 연료분사방식과 비교해 보면, 더욱 세분화된 고정밀 다단분사(multiple injection)의 구현이 어려워, 현재에는 주로 커먼레일 연료분사방식이 사용되고 있는데, 이 경우 액추에이터의 빠른 응답과 향상된 제어가 요구되기에 솔레노이드 기반 인젝터의 개발에 의한 향상은 제한되어 질 것으로 예상된다.

일반적으로 피에조 액추에이터는 lead (Pb) zirconia

(Zr) Titanate (Ti) 재질의 피에조세라믹금속의 웨이퍼 적층으로 구성되어있다. 이러한 피에조스택은 전기력에 의해 수십 마이크로미터의 한정된 작은 변위동안, 수백 뉴턴 크기의 힘을 발생시킨다. 물론 인젝터 노즐 홀의 개폐를 위한 기계적 구동력 확보 및 변위 증가를 위해 유압식 또는 기계적 시스템으로 구동되는 증폭기를 포함하고 있다. 따라서 이를 구비한 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비해, 노즐 개폐 지연 감소, 일정 레일 압력에서 활성화 시간에 대하여 분사된 연료 체적의 선형적 증가, 체류시간에 분사된 연료체적의 감소, 레일의 압력을 고압으로 올릴 수 있는 가능성 등과 같은 장점을 가지는 것으로 알려져 있다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 전자제어기반 커먼레일 분사 시스템용 피에조 인젝터의 피에조스택의 해석모

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

델을 구현한 후, 고압분사를 기반으로 분공경, In & Out 오리피스 직경, 구동전압에 따른 구동 특성을 비교 분석하고자 이론적 해석 연구를 수행하였다.

2. 피에조 인젝터 구동특성

2.1 피에조 인젝터 구동 원리

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 고압 피에조 인젝터의 구동 전류파형을 나타낸 것이다. 피에조 구동방식의 구동 전류 파형인데, 충·방전 방식으로 전류를 제어하게 된다.²⁾ 피에조 스택(piezo stack)에 전류를 흘려 전하가 충전되면 스택의 변위가 발생하며, 전류 공급이 중단되면 스택은 변위를 유지하게 된다. 그리고 스택의 방전으로 스택 변위의 축소가 유발된다. 피에조 인젝터는 피에조 소자의 역압전효과로 연료 분사를 위한 니들 구동에 필요한 힘을 발생시킨다.

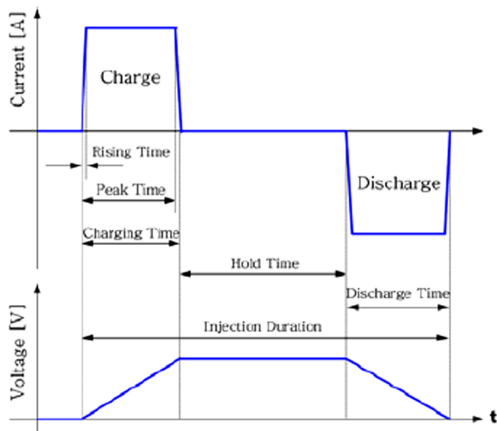


Fig. 1 Driving current wave of high pressure piezo injector used in common-rail system

2.2 AMESim을 이용한 피에조 인젝터 모델링

본 연구에서 이론적 해석을 위해 사용한 인젝터는 내부 니들 구동부를 가지는 형태로 시제품(prototype)으로 제작된 것으로써, 피에조 인젝터는 엔진 배기량 2.0 l 급에 해당되는 직접분사식 디젤 엔진에 사용되는 피에조 인젝터를 기본 모델로 하여 해석하였다.²⁾

피에조 인젝터의 기본적인 작동성능 해석을 수치적으로 검증하기 위하여, 신뢰성이 검증된 상용

AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems) 코드를 사용하여 수학적 모델을 정립한 후, 유압 해석을 수행하였다.³⁻⁵⁾

수학적 이론해석 모델을 정립시 실제 피에조 인젝터의 하드웨어 특성(크기, 수치, 물리적 작동원리 등)을 반영하도록 각 주어진 해석변수를 설정하여, 인젝터의 성능 검증과 향상을 도모하였으며, 이를 통해 실질적으로 관련 설계 및 개발시간을 최소화할 수 있도록 사전에 고려하였다.⁶⁾

본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. 해석 시간을 부여하는 신호는 선형적으로 구성되었으며, 이 입력신호는 출력으로 변환되게 된다. 이 힘은 바로 아래 부분에 위치한 스프링을 가진 피스톤에 전달되어, 일정 변위 및 일정 질량을 갖는 질량체(mass with friction and ideal end stops)를 경유하여 하단 피스톤에 적용하게 된다.

또한 커먼레일로부터 일정하게 공급되는 압력은 고압 연료 파이프를 통해 하단 feed orifice를 지나, 제어실에 채워지게 된다. 이러한 기계-유압적인 힘의 평형은 볼 밸브(ball poppet with conical seat)에 의해 유지되는데, 본 해석 모델에서는 원추형시트를 가지는 구형 포핏 밸브(spherical poppet valve)의 1차원 운동 모델로 고려하였다. 이 볼 밸브에 작용하는 순수 힘은 유체의 압력과 외부에서 작용하는 힘에 기인하게 된다.⁷⁾

Fig. 2는 피에조 인젝터의 유압해석 모델과 각 Parameter를 나타낸 것이다.

3. 해석 변수

본 연구에서는 피에조 인젝터의 해석 변수로 연료압력, 분공직경, 구동 전압을 선정하였다. 해석을 위한 결과 값으로는 Fig. 2의 P1, P2, P3 값과 니들 변위 (E), 분사율 (14) 및 분사량 값 (15)을 사용하였다.

액추에이터 밸브에 가장 근접한 P3 챔버의 압력이 가장 먼저 하강하고 뒤이어 P1, P2 챔버의 압력이 하강한다. P1과 P2 챔버의 압력이 니들을 누르고 있는 스프링 힘보다 작아지면 니들의 변위가 발생하

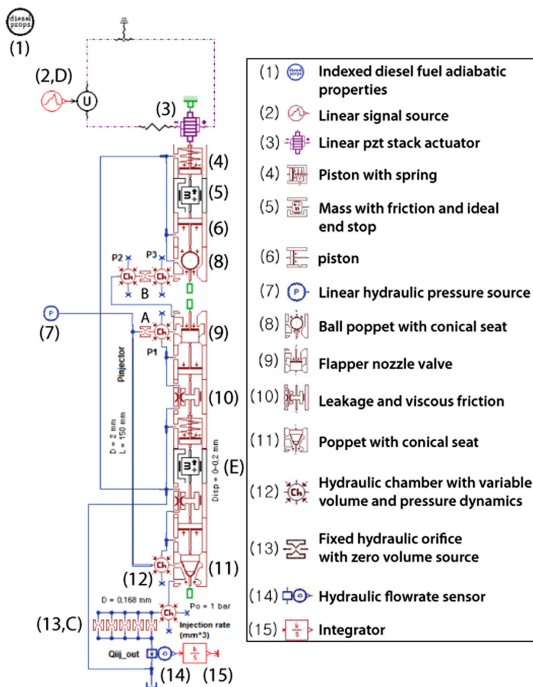


Fig. 2 Piezo injector model and parameter

여 분사하게 된다. 즉, P1, P2 챔버 압력은 Needle 변위에 영향을 주고, P3 챔버는 액추에이터 밸브에 작용하는 힘과 비례한다.

분사율과 분사량은 인젝터의 구동입력 신호크기에 따른 응답성을 평가하는 지표가 된다.

Table 1의 Parameter는 해석 모델의 기본 값이고 이것을 기준으로 변수를 설정하여 해석하였다. Table 2의 Parameter는 본 논문에서 해석한 피에조 인젝터 변수 값으로 IN orifice (A), OUT orifice (B), 분공경 (13,C), 구동전압 (2,D)의 값을 표로 나타낸 것이다.

Fig. 3은 본 해석에 적용한 인젝터의 입력신호를 나타낸 것이다. 이 외 인젝터 해석모델의 변수는 Table 1의 조건으로 일정하게 하였다.

Table 1 Analytic conditions

연료압 (bar)	1000
분공경 (mm)	0.168
IN orifice (mm)	0.22
OUT orifice (mm)	0.26
총 구동 시간 (ms)	0.1
대기압 (bar)	1

Table 2 Test conditions with main analytic parameter

IN 오리피스 경 (mm)	0.2	0.22	0.24
OUT 오리피스 경 (mm)	0.24	0.26	0.28
분공경 (mm)	0.118	0.168	0.218
구동 전압 (V)	150	200	250

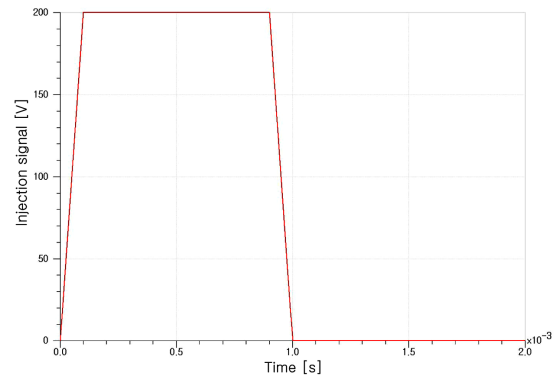


Fig. 3 Input signal for driving the piezoelectric actuator

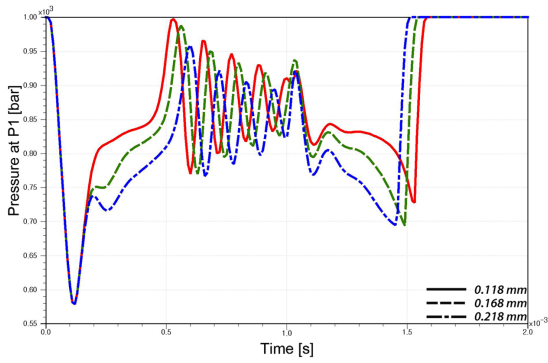
4. 연구 결과

4.1 분공경 변화의 경우

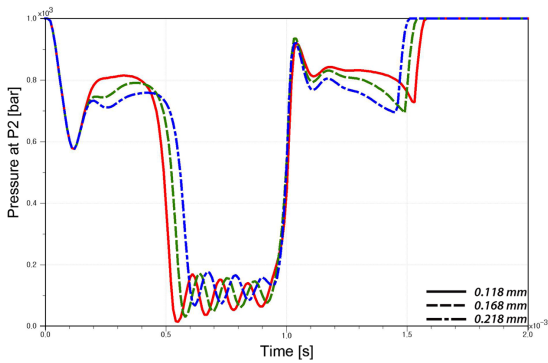
Fig. 4는 피에조 인젝터의 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, P1, P2, P3 지점에서의 연료 압력 변동을 나타낸 것이다. 분사 초기, 인젝터 내부 압력강하에 미치는 분공경의 영향이 없음을 알 수 있었다. 또한 분공경이 클수록 분사 말기 연료 압력회복시기가 빠른 것은 초기 압력 강하 폭이 증가하여 니들의 빠른 닫힘에 영향을 준 것으로 판단된다. 반면 분공경이 작을수록 분사시간 중 압력변동이 큰 폭으로 더 일찍 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 피에조 인젝터의 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, needle의 변위를 나타낸 것이다. 초기 니들 변위가 없는 것은 유압회로에 의한 연료압력 변화로 니들 구동이 발생하는 인젝터의 고유특성에 기인한 것으로 판단된다. 또한 분공경이 클수록 인젝터 니들의 최대 변위까지 이동 시간은 증가하지만, 닫힐 때의 시간은 감소하는 경향을 보였다.

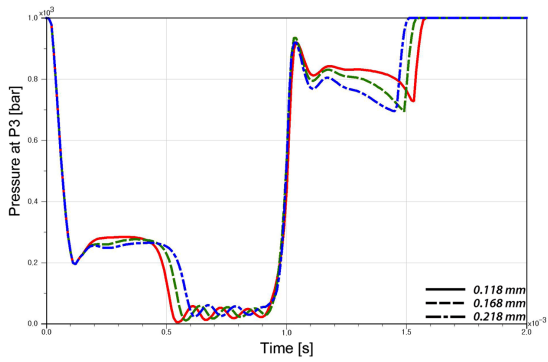
피에조 인젝터의 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, Fig. 6은 연료 분사율 그리고 Fig. 7은 연료 분사량을 나타낸 것이다. 그림과 같이 분공경이 크면 최대 분사율은 증가하지만, 분사 기간이



(a) P1



(b) P2



(c) P3

Fig. 4 Effect of injection hole diameter on pressure at P1, P2, P3 position

짧아지며, 분공경 증가에 분사량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 기학적 형상은 원형으로 동일하나, 분사율 증가는 단면적과 비례 관계인 유량 및 분사 압력 강하에 기인한 것으로 판단된다.

4.2 IN orifice 직경 변화의 경우

Fig. 8 은 피에조 인젝터의 IN orifice 직경이 0.2,

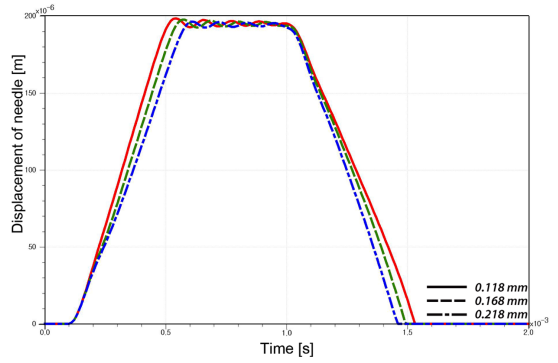


Fig. 5 Effect of injection hole diameter on needle behavior

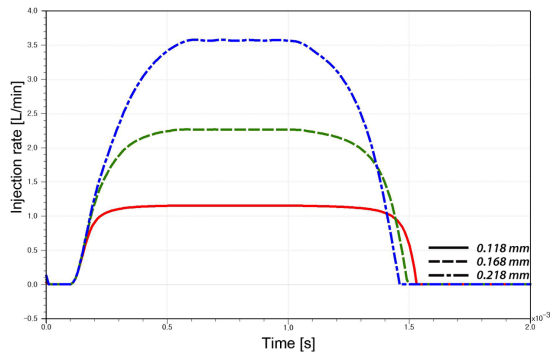


Fig. 6 Effect of injection hole diameter on Injection rate

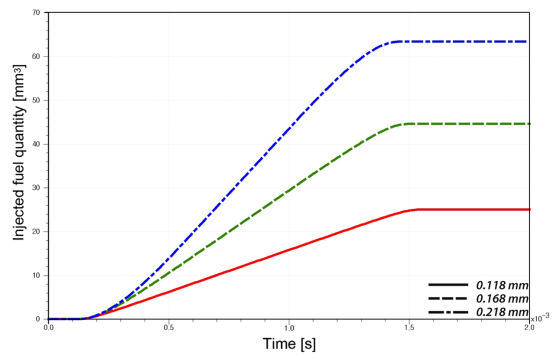
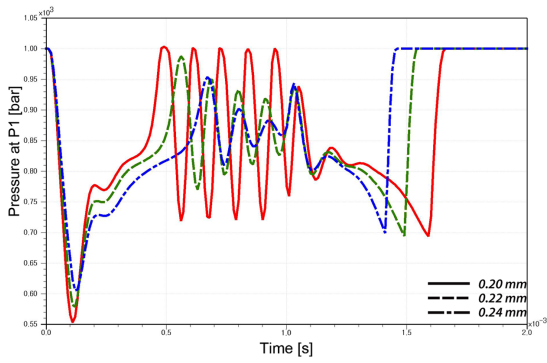
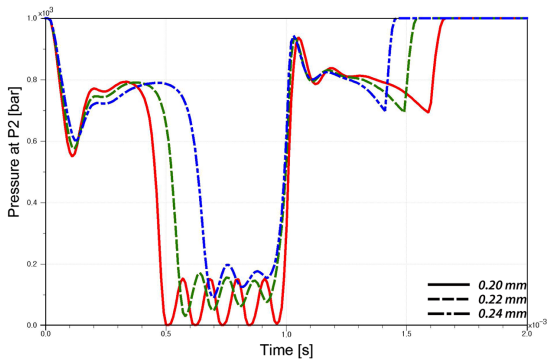


Fig. 7 Effect of injection hole diameter on Injected fuel quantity

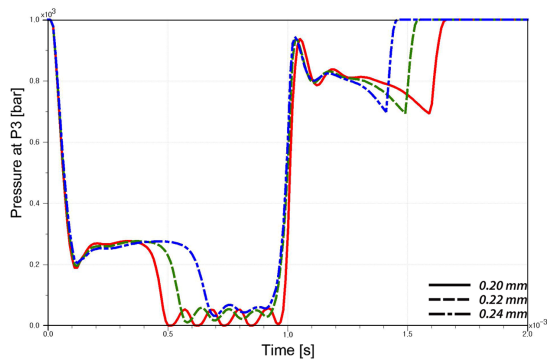
0.22, 0.24 mm일 때, P1, P2, P3지점에서의 연료 압력 변동을 나타낸 것이다. IN orifice 직경의 증가는 분사 말기 약 0.1ms 빠른 압력회복시기에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. (a)의 경우 직경이 작을수록 초기 구동 시 압력강하 및 구동 중 최대 압력 변동폭 증가에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 또한 (b), (c)의 경우 직경의 증가로 압력하강이 가장 큰 최대연



(a) P1



(b) P2



(c) P3

Fig. 8 Effect of IN orifice diameter on pressure at P1, P2, P3 position

료량분사 기간이 단축되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 피에조 인젝터의 IN orifice 직경이 0.2, 0.22, 0.24 mm일 때, 니들 변위를 나타낸 것이다.

IN orifice 직경 증가로 최대 니들변위까지의 이동 시간이 증가하고, 빠른 니들의 단힘을 알 수 있는데, 특히 0.02 mm라는 작은 변화에 대비 큰 기울기 변화

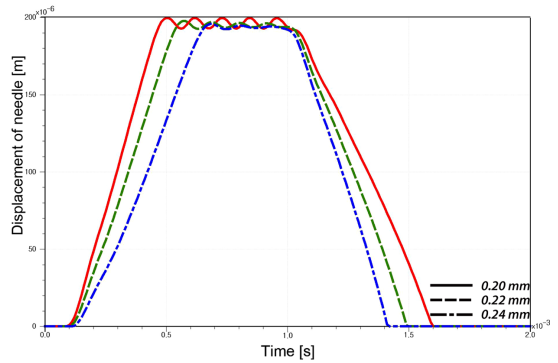


Fig. 9 Effect of IN orifice diameter on needle behavior

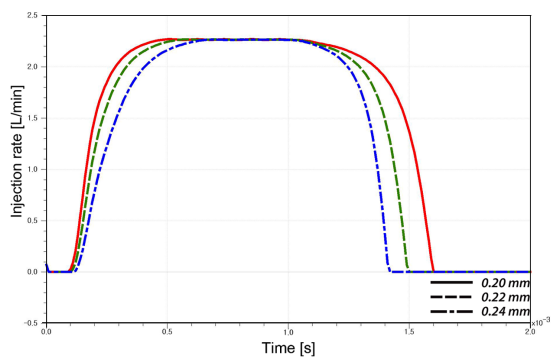


Fig. 10 Effect of IN orifice diameter on Injection rate

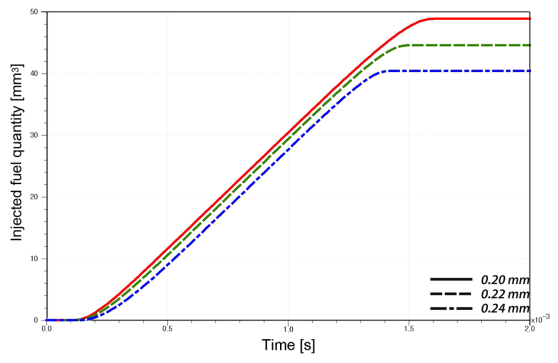
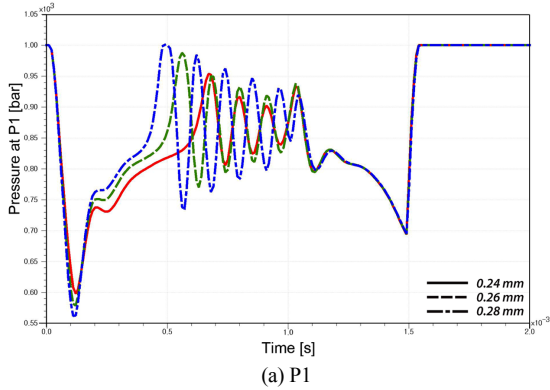


Fig. 11 Effect of IN orifice diameter on Injected fuel quantity

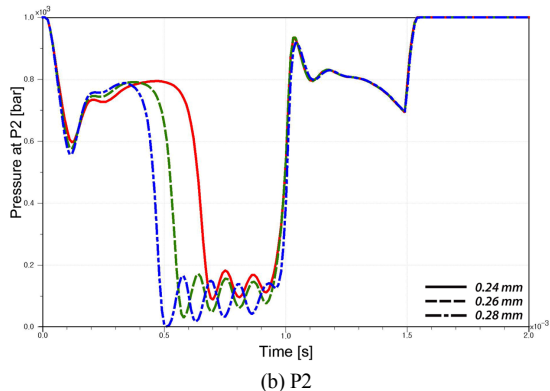
를 보인다. Fig. 10과 11은 피에조 인젝터 IN orifice 직경변화에 따른 연료 분사율과 연료 분사량을 나타낸 것이다. 직경 증가는 분사초기 낮은 분사율과 분사 말기 빠른 분사율 감소에 영향을 보여 준다. 그러나 직경은 증가하지만 연료분사량은 오히려 적어짐을 알 수 있다. 그리고 분사량 상승중 0.2~0.22 mm로 변화시 그래프 간격보다 0.22~0.24 mm로 변화할 때의 간격차이가 비례적이지 못함을 알 수 있었다.

4.3 OUT orifice 직경 변화의 경우

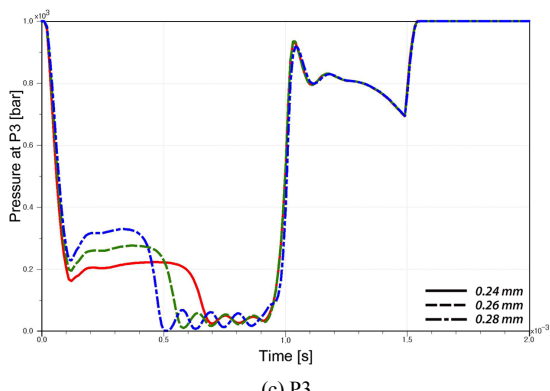
Fig. 12는 피에조 인젝터의 OUT orifice 직경이 0.24, 0.26, 0.28 mm일 때, P1, P2, P3지점에서의 연료 압력 변동을 나타낸 것이다. (a)의 경우 직경의 증가로 초기 구동 시 압력강하 증가, 빠른 연료압력 변동이 발생한다는 것을 알 수 있다. (b), (c)의 경우 직경



(a) P1



(b) P2



(c) P3

Fig. 12 Effect of OUT orifice diameter on pressure at P1, P2, P3 position

의 증가로 최대압력강하가 발생하는 시점이 최대 0.2 ms 앞당겨지고 있고, 최대압력강하의 크기도 증가함을 알 수 있다. 그러나 직경변화와 분사 말기 압력회복은 특별한 연관성이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 피에조 인젝터의 OUT orifice 직경이 0.24, 0.26, 0.28 mm일 때, 니들 변위를 나타낸 것이다. 직경의 증가는 구동 초기 니들의 최대변위까지 빠른 이동과 관련 있다는 것을 알 수 있다.

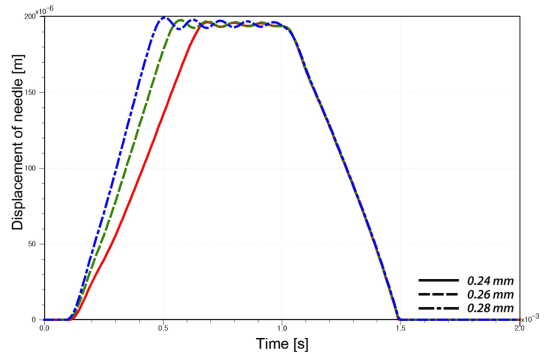


Fig. 13 Effect of OUT orifice diameter on needle behavior

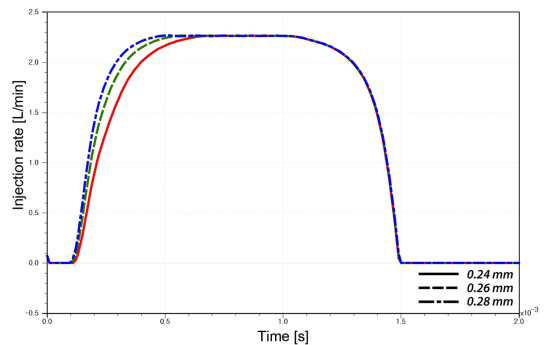


Fig. 14 Effect of OUT orifice diameter on Injection rate

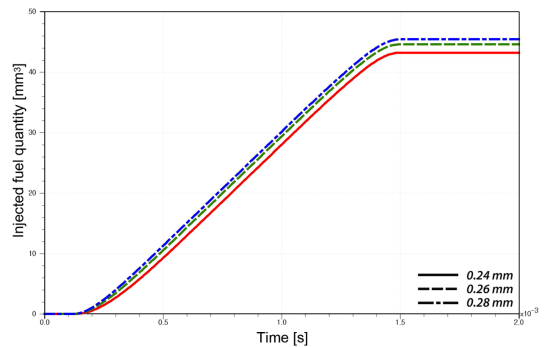


Fig. 15 Effect of OUT orifice diameter on Injected fuel quantity

Fig. 14와 15는 피에조 인젝터의 OUT orifice 직경이 0.24, 0.26, 0.28 mm일 때, 연료분사율과 연료 분사량을 나타낸 것이다. 초기 구동 시 니들 속도에 영향을 주는 것과 연관되어, 직경 증가는 초기 연료분사율의 증가를 가져온다.

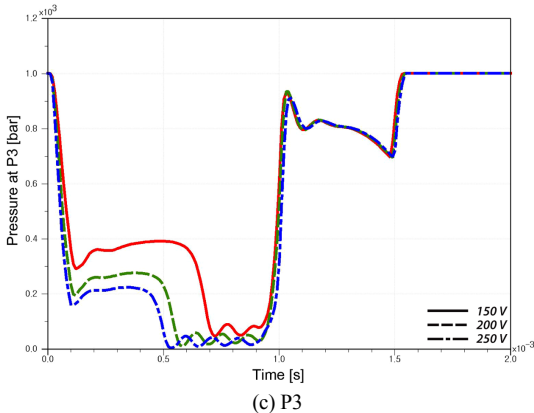
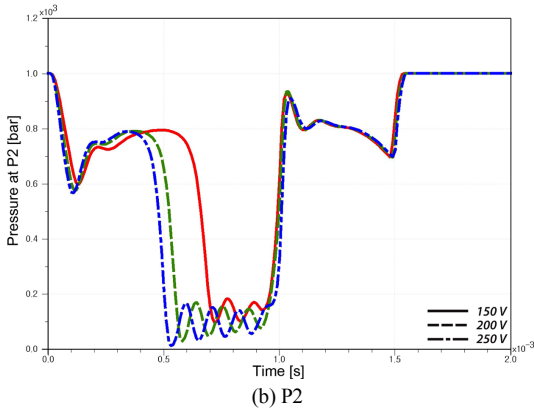
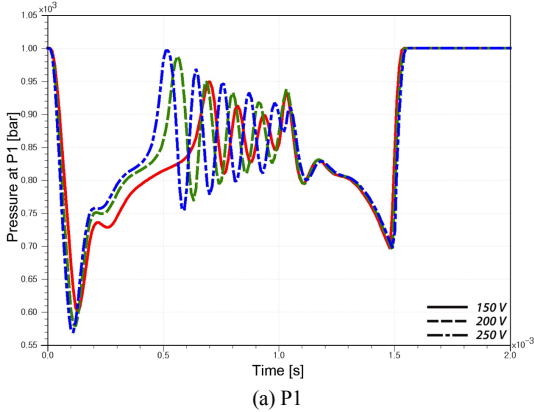


Fig. 16 Effect of input voltage of piezo injector on pressure at P1, P2, P3 position

4.4 구동 전압 변화의 경우

Fig. 16은 피에조 인젝터 구동 전압이 150, 200, 250 V일 때, P1, P2, P3지점에서 연료 압력 변동을 나타낸 것이다. (a)의 경우 구동 전압 상승으로 초기 구동 시 압력강하 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 150-200V에 비하여 200-250V일 때의 압력강하의 정도는 상대적으로 적음을 알 수 있다. 또한 (b), (c)의 경우 구동 전압 증가할수록 최대 0.2 ms 빠른 최대압력강하의 발생을 알 수 있었다.

Fig. 17은 피에조 인젝터 구동 전압이 150, 200, 250 V일 때, 니들의 변위를 나타낸 것이다. 전압 상승으로 초기 니들 변위 속도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 200 V 이상에서 전압상승 효과는 점차 줄어든다. 초기 분사율이 발생하는 시간도 미세하게 빨라지고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 18과 19는 피에조 인젝터 구동 전압이 150,

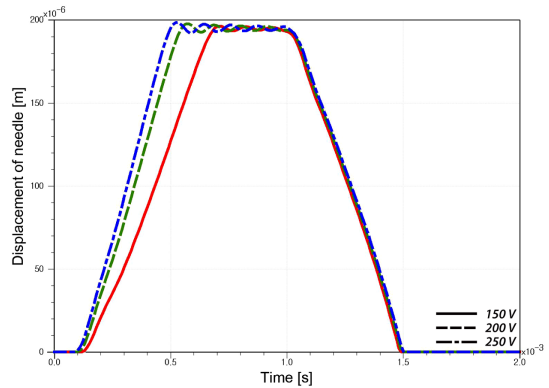


Fig. 17 Effect of input voltage of piezo injector on needle behavior

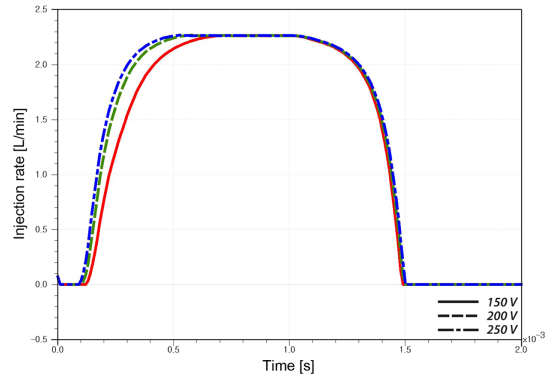


Fig. 18 Effect of input voltage of piezo injector on Injection rate

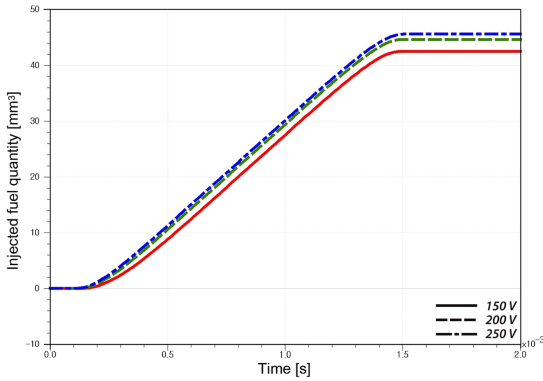


Fig. 19 Effect of input voltage of piezo injector on Injected fuel quantity

200, 250 V일 때, 연료분사율과 연료분사량을 나타낸 것이다. 전압상승에 따라 빠른 니들 거동과 연계하여 초기 분사율 상승이 발생되며, 전압상승과 연료 종료시점과의 연관성은 다소 적지만, 압력상승에 따른 피에조 스택의 반응성으로 초기 빠른 니들 구동에 따른 연료량 증가를 나타냄을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 피에조 인젝터의 구동부인 피에조 스택의 해석모델을 구현한 후, 피에조 인젝터의 내부 유압 거동 및 분사 민감도 특성을 해석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인젝터 분공경 증가는 분사 말기 빠른 연료압력 회복시기, 니들의 최대 변위까지 이동 시간 증가, 니들이 닫히는 시간 감소, 최대 분사율 증가, 짧은 분사 기간, 분사량 증가에 영향을 미침을 알 수 있었다. 분사 초기 압력강하차이는 그다지 크지 않으며, 분공경 감소로 분사기간 중 압력변동이 큰 폭으로 더 일찍 발생함을 알 수 있었다.
- 2) IN orifice 직경의 증가는 분사 말기 약 0.1ms 빠른 압력회복시기, 압력강하가 가장 큰 최대연료량분사 기간이 단축, 최대 니들변위까지의 이동 시간이 증가, 분사초기 낮은 분사율과 분사 말기 빠른 분사율 감소, 연료분사량 감소에 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 직경 감소는 초기 구동시 압력강하 및 구동 중 최대 압력 변동폭을 증가시킴을 확인할 수 있었다.

- 3) OUT orifice 직경 증가는 초기 구동 시 압력강하 증가, 빠른 연료압력 변동, 최대 0.2 ms 빠른 최대 압력강하 발생, 구동 초기 니들의 최대변위까지 빠른 이동, 초기 연료분사율 증가의 결과를 유도함을 알 수 있었다.
- 4) 구동 전압이 높을수록 초기 니들 변위 속도 증가, 빠른 초기 분사율 상승 및 초기 빠른 니들 구동에 따른 연료량 증가를 발생시킴을 알 수 있었다.
- 5) OUT orifice 직경 변화의 경우와 구동 전압 변화의 경우를 비교해 보면, P1, P2 챔버 압력은 니들 변위에 영향을 주며 커먼레일과 니들 구동에 영향을 받아 유사한 결과를 나타내지만, P3 챔버는 액추에이터 밸브에 작용하는 힘에 비례하기 때문에 매우 다른 경향을 가짐을 알 수 있었다.

후 기

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

References

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) D. T. H. Talas and A. D. Kouremenos, "Development of a Fast and Simple Simulation Model for the Fuel Injection System of Diesel Engines," Advanced in Engineering Software, Vol.29, No.1, pp.13-28, 1998.
- 4) G. M. Bianchi, S. Falfari, M. Parotto and G. Osbat, "Advanced Modelling of Common Rail Injector Dynamics and Comparison with Experiments," SAE 2003-01-0006, 2003.

- 5) O. Chiavola and P. Giulianelli, "Modelling and Simulation of Common Rail System," SAE 2001-01-3183, 2001.
- 6) J. W. Lee, Study on Driving Performance, Spray Characteristics and Cavitation Flow of a Piezo-driven Diesel Injector, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, 2005.
- 7) J. W. Lee and K.-D. Min, "Analysis of Hydraulic Characteristics of High Pressure Injector with Piezo Actuator," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.164-173, 2006.