

AMESim기반 CRDi용 인젝터의 2단분사 동적거동 특성해석

조인수* · 권지원* · 이진욱**†

Analysis of Dynamic Characteristics in Two-stage Injection for CRDi Injectors Based on AMESim Environment

Insu Jo, Jiwon Kwon and Jinwook Lee

Key Words: Two-stage injection(2단분사), dynamic characteristics(동특성), Piezo stack(피에조 스택), Inverse piezo-electric effect(역압전효과), AMESim simulation code(AMESim 해석 코드)

Abstract

For reduction of CO, NOx and soot emission emitted by diesel diffusion combustion, the authors focused on injection actuator to improve fuel availability inside combustion chamber. In this study, it was investigated the internal dynamic characteristics of two-stage injection with diesel injectors with different driving type for the common rail direct injection by using the AMESim simulation code. The analysis parameter defined such as fuel pressure, injection hole's diameter and driven voltage. As the results, it was shown that the piezo-driven injector had a faster response and had better control capability than the solenoid-driven injector. It was found the piezo-driven injector can be utilized effectively as multiple injector than solenoid-driven injector.

1. 서 론

오늘날 세계 자동차 기술은 차량에서 배출되는 대기 오염물인 CO, NOx 등과 같은 유해물의 규제와 함께 연료 소모량을 줄이면서 효율을 높이고, 동력 성능은 유지 또는 향상시켜야 하는 다양한 요구를 동시에 만족해야 하는 과제에 직면해있다. 이를 실현하기 위해 연료를 단계적으로 나누어 분사하는 다단분사(multiple injection) 기술의 실현이 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.

다단분사는 기본적으로 Pilot과 Main 분사로 나누어지고, Pre, 및 After, Post 분사 등의 과정이 추가되어 유해 배출물 및 소음 진동 저감을 구현하게끔 한다.

이러한 고압연료의 다단분사는 인젝터의 구동방식과 밀접한 관련이 있다. 현재 대부분 사용 중인 솔레노이드 인젝터는 피크-홀드(peak and hold)방식으로 구동되는데, 구동 전류를 상승시키기 위하여 고압 전원장치로 전류를 증가시켜 전류 상승시간을 줄이기 때문에 전력소모가 많으며, 제어도 복잡하다. 그러나 인젝터 구동부를 피에조 스택(piezo stack)으로 대체한 경량화 된 피에조 인젝터는 전류 및 전력의 소비가 낮고 고속응답성과 제어성 등에서 보다 유리한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 고압 인젝터인 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 구동 전류 파형을 나타낸 것이다. 솔레노이드 인젝터는 전자기 유도 소자인 코일로 만들어진 솔레노이드에 전압을 인가하여 전류 상승시간(rising time)과 하강시간(falling time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이고 있다. 일반적으로 솔레노이드 인젝터를 구동하기 위해서는 차량 전원(battery)에서 공급되는 12V의 전압만으로는 100 μ s 이내에서 20A까지 구동 전류를 상승시키는 것은 불가능하

(2012년 1월 26일 접수 ~ 2012년 3월 5일 심사완료, 2012년 3월 11일 게재확정)

*충실대학교 대학원 기계공학과

**충실대학교 기계공학과

†책임저자, 종신회원, 한국액체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02) 820-0929

기 때문에, 더 높은 전압을 인가하여 솔레노이드의 전류를 증가시키고 전류 상승시간을 줄여야 한다. 따라서 초기 상승전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치(charge pump)가 필요하게 된다. 반면에, Fig. 1(b)는 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. 즉, 피에조 인젝터는 피에조 소자의 역압전효과로 연료 분사를 위한 니들 구동에 필요한 힘을 발생시킨다.

따라서 본 연구에서는 전자제어기반 커먼레일 분사 시스템용 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터를 대상으로 2단 분사 시, 인젝터 내부 동적거동 특성을 상호 비교분석하기 위해, 인젝터 구동 해석모델을 구현한 후, 인젝터 구동방식에 따른 고압분사특성 해석을 수행하였다.

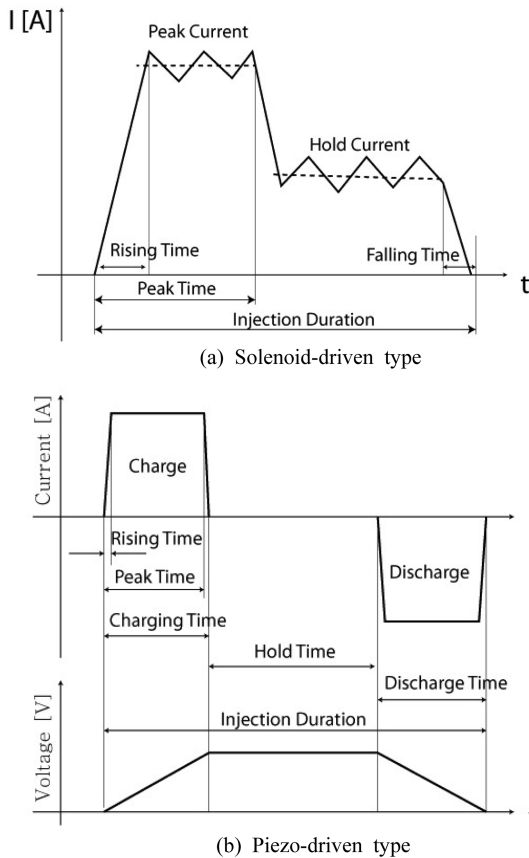


Fig. 1 Driving current wave between solenoid and piezo-driven injector

2. 해석 모델링 및 해석조건

2.1 AMESim을 이용한 인젝터 구동모델

본 연구에서는 솔레노이드 인젝터와 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^(2,4).

본 연구에서 적용된 피에조 인젝터는 엔진 배기량 2.0 l 급 직접분사식 디젤엔진에 사용되는 솔레노이드 인젝터를 기본 모델로 하여 해석하였다⁽⁵⁾.

그리고 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 포켓 밸브(spherical pop-

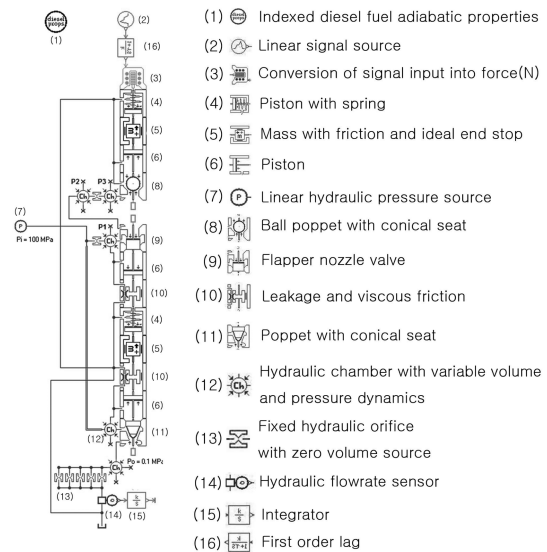


Fig. 2 Injector model and parameter

pet valve)의 1차원 운동 모델로 고려하였다. 이 볼 밸브에 작용하는 순수 힘은 유체의 압력과 외부에서 작용하는 힘에 기인하게 된다.

Fig. 2는 유압해석 모델과 각 Parameter를 나타낸 것이다. 피에조 인젝터의 해석을 위해 Fig. 3의 피에조 액추에이터로 대체하여 해석을 하게 된다.

해석에 사용된 분사 시간 및 기간은 실제 배기량 2.0 l 급 직접분사식 디젤엔진의 솔레노이드 구동 신호를 기반으로 설정하였다.

2.2 인젝터 2단분사 해석변수

본 연구에서는 2단분사시, 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 해석 변수로 연료압력, 분공직경, 구동 전압을 선정하였다. 해석을 위한 결과값으로는 Fig. 2의 P1, P2, P3 값과 분사율 및 분사량 값을 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 발생하여 분사하게 된다. 즉, P1, P2 챔버 압력은 Needle 변위에 영향을 주고, P3 챔버는 솔레노이드 밸브에 작용하는 힘과 비례한다. 분사율과 분사량은 인젝터의 구동입력 신호 크기에 따른 응답성을 평가하는 지표가 된다. Table 1의 Parameter는 해석 모델의 기본 값이고 이것을 기준으로 변수를 설정하여 해석하였다. 그리고 다단 분사

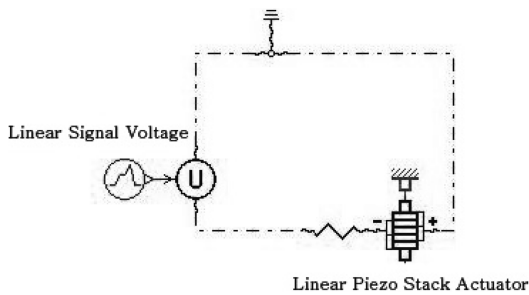
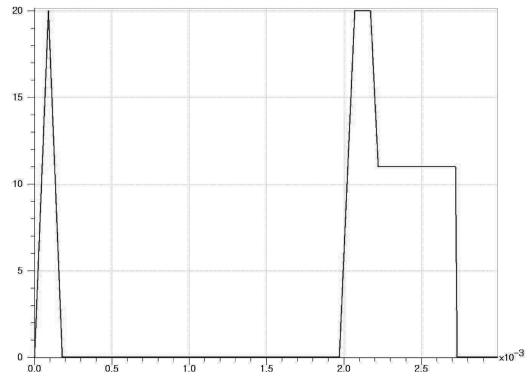


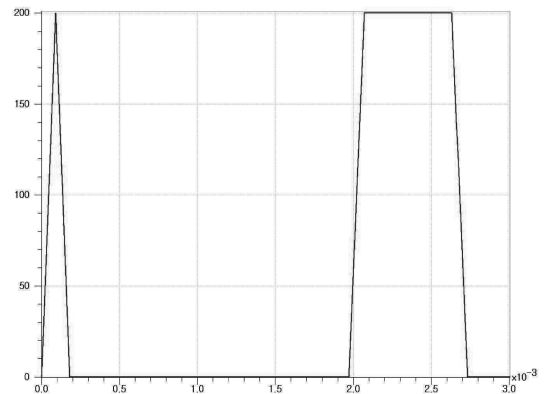
Fig. 3 Analytic model for driving the piezoelectric actuator

Table 1 Test conditions with main analysis parameter

총 구동 시간 (μs)	Pilot		Main
	180		720
분공경 (mm)	0.118	0.168	0.218
다단분사 연료압 (bar)	1000	1300	1600



(a) Solenoid injector



(a) Piezo injector

Fig. 4 Two-stage injection signal used in this study

의 경우, Fig. 4와 같이 사전(Pilot)분사와 주(Main)분사로 구성된 2단 분사로 해석하였고, 두 인젝터 모두 전체 입력신호, 분사 시기 그리고 분사 기간의 시간을 동일하게 설정하였다.

3. 해석 결과

3.1 P1, P2, P3지점에서의 유압변화 비교

Fig. 5는 연료압력 1000, 1300, 1600 bar 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 P1에서 압력변화를 나타낸 것이다. 솔레노이드 인젝터는 피에조 대비 파일럿 분사와 메인분사 전체 기간이 짧게 나타남을 알 수 있다. 전반적으로 유사한 압력 변화 패턴을 보이며, 압력이 높을수록 분사 말기 압력회복 시간지연이 나타난다. 그러나 피에조 파일럿 분사의 경우에는 지연시간이 차이가 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

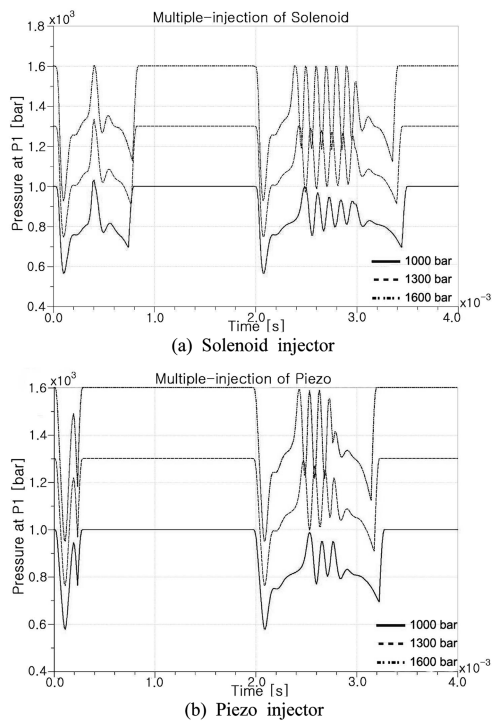


Fig. 5 Pressure variation at P1 position between solenoid and piezo injector

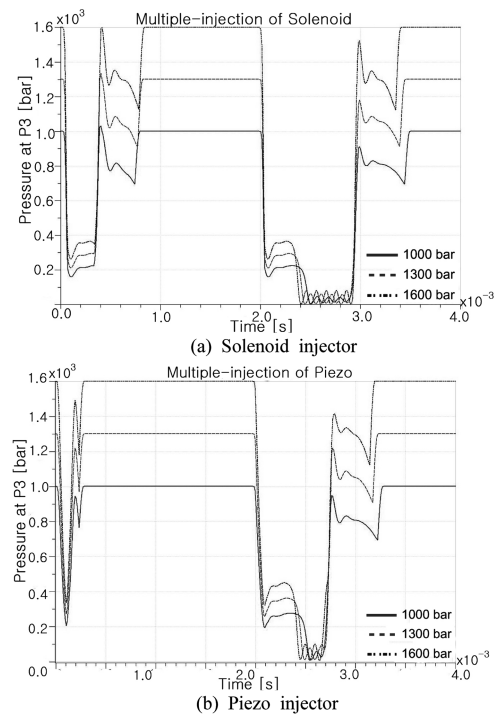


Fig. 7 Pressure variation at P3 position between solenoid and piezo injector

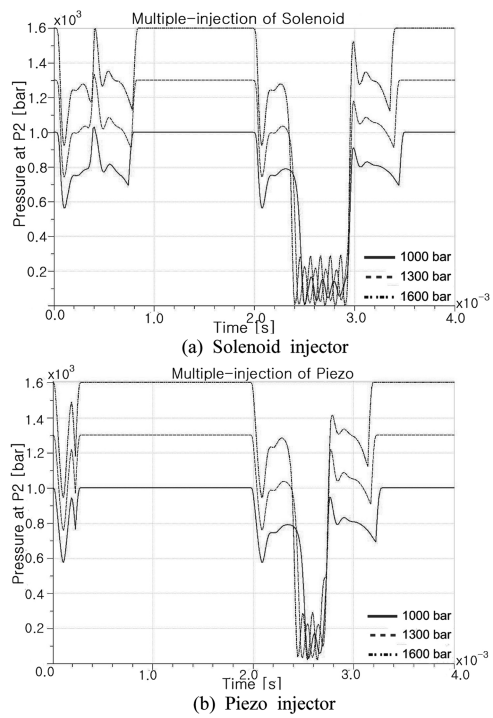


Fig. 6 Pressure variation at P2 position between solenoid and piezo injector

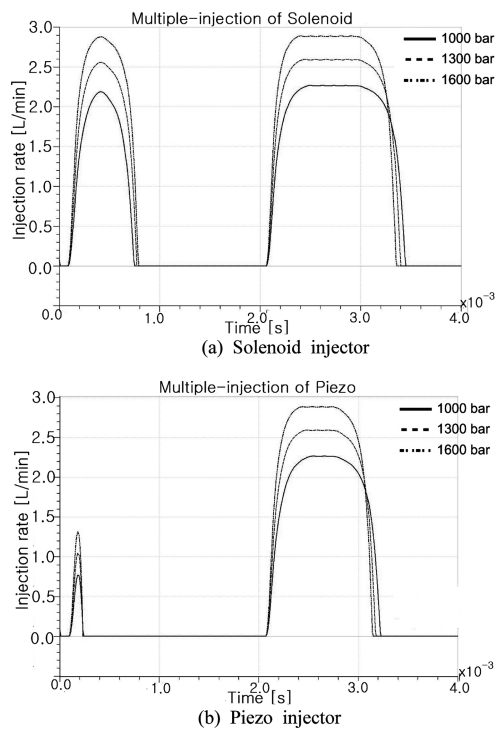


Fig. 8 Injection rate between solenoid and piezo injector

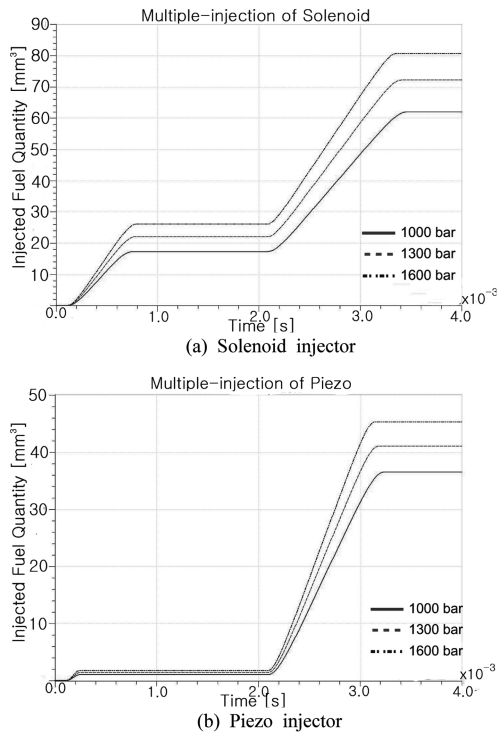


Fig. 9 Injected fuel quantity between solenoid and piezo injector

Fig. 6은 연료압력 1000, 1300, 1600 bar 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 P2에서 압력변화를 나타낸 것이다. 분사 말기, 피에조 인젝터는 솔레노이드 방식 대비 약 0.1 ms 빠른 연료압력회복 속도를 가짐을 알 수 있으며, Fig. 7의 P3지점에서 압력변화를 비교해 보면, 솔레노이드 인젝터의 파일럿 분사 시 압력강하의 크기가 피에조에 비해 더 크음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 연료압력 1000, 1300, 1600 bar 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 분사율을 나타낸 것이다. 피에조 인젝터의 파일럿 분사율은 솔레노이드에 비해 연료압력별로 현격한 차이를 보여주고 있으며, 메인분사의 기간도 짧아짐을 알 수 있었다.

Fig. 9는 연료압력 1000, 1300, 1600 bar 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 분사량을 나타낸 것이다. 메인 분사 시, 피에조의 연료량 증가 속도가 상대적으로 빠름을 알 수 있었다.

3.2 인젝터 분공경 영향

Fig. 10은 분공경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, 솔

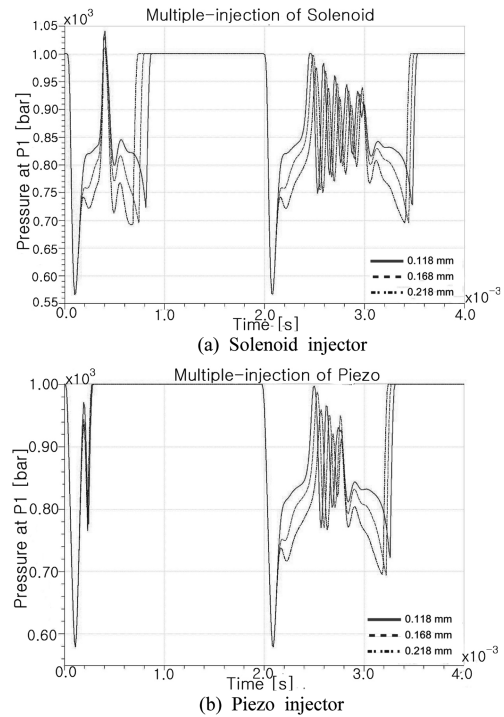


Fig. 10 Effect of injection hole diameter on pressure at P1 position

레노이드와 피에조 인젝터의 P1에서 압력변화를 나타낸 것이다. 분공경이 작아짐에 따라 압력회복시간이 지연되고 있는 것을 알 수 있으며, 피에조 인젝터의 경우, 파일럿분사에서 분공경에 의한 영향보다는 메인 분사 종료 후, 압력회복 시간에 차이가 있음을 알 수 있었다.

즉, 피에조 인젝터의 경우, 짧은 시간의 분사에는 분공경의 영향은 미미하나, 파일럿 분사 시 연료압력이 변동하는 지점에서 분공경이 큰 경우 압력강하의 폭이 더 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 11은 분공경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 P2에서 압력변화를 나타낸 것이다. 메인분사에서 전반적인 압력 패턴은 유사하지만, 최대압력강하 시, 약 0.7 ms의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 분공경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일 때, 솔레노이드와 피에조 인젝터의 P3에서 압력변화를 나타낸 것이다. 2단 분사기간 동안 압력회복은 피에조 인젝터의 경우, 약 0.1 ms정도 더 빠른 분사종료를 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 인젝터의 구동부인 솔레노이드와 피에조 스택의 해석모델을 구현한 후, 2단분사 고속응답 특성을 비교 분석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전체 구동시간(입력신호시간)을 기준으로 볼 때, 피에조 인젝터의 분사율과 분사량의 지연시간이 솔레노이드 인젝터보다 짧음을 알 수 있었다.

2) 솔레노이드 인젝터의 파일럿 분사 시, 더 큰 압력강하가 발생하며, 피에조 인젝터의 파일럿 분사율은 솔레노이드에 비해 현격한 차이를 보였고, 메인분사의 기간도 짧아짐을 알 수 있었다. 또한 메인 분사 시, 피에조의 연료량 증가 속도가 빨라지며, 연료압력 상승 시, 분사 말기 압력회복 시간지연이 나타나서, 피에조 인젝터는 솔레노이드 대비 약 0.1 ms 빠른 연료압력 회복 속도를 가짐을 알 수 있었다.

3) 2단 분사의 사전분사 시, 미소한 구동시간에 대한 두 인젝터의 구동 패턴은 현격한 차이를 보임을 알 수 있었다. 이 결과로부터 더 세분화된 다단분사의 경우, 피에조 액추에이터로 구동되는 인젝터가 더 제어성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

4) 인젝터 분공경 축소 시, 압력회복시간이 지연되었는데, 피에조 인젝터의 경우 메인분사 종료 후 압력회복 시간에 차이를 보였다. 파일럿 분사 시 연료압력이 변동하는 지점에서 분공경이 큰 경우, 압력강하의 폭이 더 크게 나타나, 최대압력강하 시 약 0.7 ms의 차이가 발생할 수 있었다. 이를 통해 피에조 인젝터의 경우, 파일럿 분사 시 분공경의 영향이 적어, 분사 연료량 제어에 훨씬 더 유리함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것이며(2010-0004253), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) J. W. Lee, "Study on driving performance, spray characteristics and cavitation flow of a piezo-driven Diesel

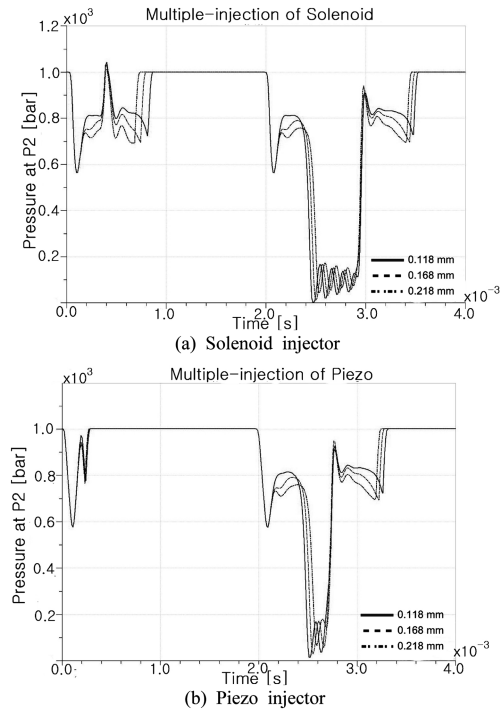


Fig. 11 Effect of injection hole diameter on pressure at P2 position

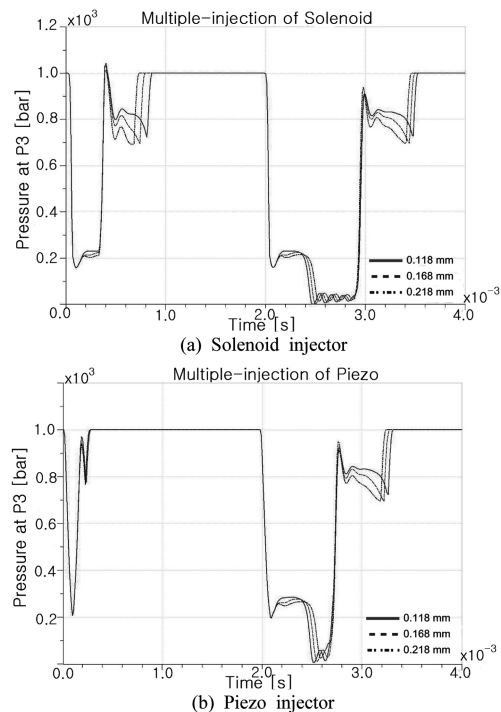


Fig. 12 Effect of injection hole diameter on pressure at P3 position

- injector”, Doctoral Dissertation, Seoul National University, 2005.
- (2) D. T. Hountalas 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, 1998.
- (3) 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.
- (4) O. Chiavola and P. Giulianelli, “Modelling and Simulation of Common Rail System”, SAE 2001-01-3183, 2001.
- (5) J. W. Lee and K. D. Min, “Analysis of Hydraulic Characteristics of High Pressure Injector with Piezo Actuator”, *KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 164~173, 2006.