

## 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 고속분사 응답성 해석

조인수\* · 이중협\* · 이진욱\*†

\* 숭실대학교 기계공학과

### Analysis of Fast Injection Response Characteristics Between Solenoid and Piezo-Driven Injector

In Su Jo\*, Jung Hyup Lee\*, Jin Wook Lee\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.

(Received February 6, 2012 ; Revised July 27, 2012 ; Accepted July 31, 2012)

**Key Words:** Solenoid-Driven Injector(솔레노이드 인젝터), Piezo-Driven Injector(피에조 인젝터), Inverse Piezo-Electric Effect(역압전효과), AMESim Simulation Code(AMESim 해석 코드), CRDi System(커먼레일 직접분사시스템)

**초록:** 고압 인젝터의 성능은 디젤 연소엔진의 동력, 배출물, 연료소모와 직접적인 관계가 있다. 본 논문에서는 솔레노이드 코일과 피에조 세라믹으로 구동되는 커먼레일 디젤 분사용 인젝터의 응답 특성을 AMESim 코드를 사용하여 상대 비교 연구를 수행하였다. 따라서 연료압력, 분공경을 주요 해석변수로 설정하였다. 본 연구를 수행한 결과, 솔레노이드 구동 인젝터에 비해 피에조 구동 인젝터가 상대적으로 더 빠른 응답성과 더 높은 제어성을 가짐을 알 수 있었으며, 특히 다단분사 적용시, 이런 결과가 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** It is well known that the performance of a diesel injector is directly related to the power, emission, and fuel consumption of the diesel combustion engine. In this study, the injection response characteristics of CRDi injectors driven by a solenoid coil and a piezoceramic were investigated by using the AMESim simulation code. Some analytical parameters such as the fuel pressure and hole diameter were considered. From this study, it was shown that the piezo-driven injector had a faster response and had better control capability than the solenoid-driven injector. In addition, it was found that the piezo-driven injector can be utilized more effectively in a multiple injection scheme than a solenoid-driven injector.

## 1. 서 론

커먼레일 분사시스템과 전자식 인젝터는 경유 자동차 엔진기술의 발전에 지대한 영향을 미친다. 하지만 점차 강화되는 유해 배출물 규제와 연소 효율 개선 및 동력성능 향상 요구를 충족하기 위해, 현재 보다 더 고성능화된 인젝터 개발이 요구되고 있다. 지금까지 고압 연료분사용으로 많이 사용 중인 솔레노이드 인젝터는 피크-홀드 방식으로 구동되는데, 이 경우 구동전류를 상승시키기 위하여 고압 전원장치로 전류를 증가시켜 전류 상승시간을 줄이기 때문에 전력소모가 많을 뿐만 아니라 제작비용 및 제어 복잡성 측면

에서 상대적으로 어려운 단점이 있다. 반면, 인젝터 구동부를 피에조 스택으로 대체한 피에조 인젝터는 전류 및 전력의 소비가 낮고 제어성 등에서 보다 유리한 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup>

따라서 본 연구에서는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 내부 동적거동 특성(internal dynamic characteristics)을 상호 비교·해석하고자, 각각의 인젝터 구동 해석모델을 구현 후 이론적 연구를 수행하였다.

## 2. 연료분사 구동원리 및 모델링

### 2.1 솔레노이드 및 피에조 인젝터 구동 원리

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 고압 인젝터인 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 구동 전류파형을 나타낸 것이다. 현재 상용

† Corresponding Author, [immanuel@ssu.ac.kr](mailto:immanuel@ssu.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

화되어 주로 사용중인 커먼레일 분사시스템용 고압 인젝터는 Fig. 1(a)와 같이 솔레노이드에 의해 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식인데,<sup>(3,5)</sup> 이는 가솔린 엔진용 인젝터와는 달리 구동 전류가 크며 피크-홀드(peak and hold)방식으로 전류를 제어한다. 즉, 전자기 유도 소자인 코일로 만들어진 솔레노이드에 전압을 인가하여 전류 상승시간(rising time)과 하강시간(falling time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이고 있다. 반면에, Fig. 1(b)는 피에조 구동방식의 구동 전류 파형인데, 충·방전 방식으로 전류를 제어하게 된다.<sup>(6,7)</sup> 피에조 스택(piezo stack)에 전류를 흘려 전하가 충전되면 스택의 변위가 발생하며, 전류 공급이 중단되면 스택은 변위를 유지하게 된다. 마지막으로 스택의 방전으로 스택 변위의 축소가 유발된다.

2.2 AMESim을 이용한 인젝터 모델링

본 연구에서 이론적 해석을 위해 사용한 피에조 인젝터는 엔진 배기량 2.0ℓ 급에 해당되는 직

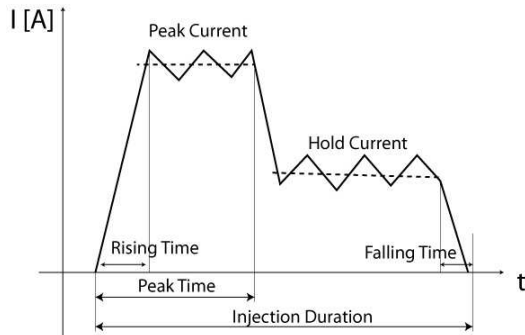
접분사식 디젤엔진에 사용되는 솔레노이드 인젝터를 기본 모델로 하여 해석하였다.<sup>(2)</sup> 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 기본적인 작동성능 해석을 수치적으로 검증하기 위하여, 신뢰성이 검증된 상용 AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems) 코드를 사용하여 수학적 모델을 정립한 후, 유압 해석을 수행하였다. 이 해석 방법은 인젝터 시스템의 설계 초기단계 및 설계과정에서 다단분사 성능 검증과 향상을 도모할 수 있으며, 또한 설계 및 개발시간을 최소화할 수 있는 장점이 있다.<sup>(8-10)</sup>

본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. 해석 시간을 부여하는 신호는 선형적으로 구성되었으며, 이 입력 신호는 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. Fig. 2는 유압 해석 모델과 각 Parameter를 나타낸 것이다.

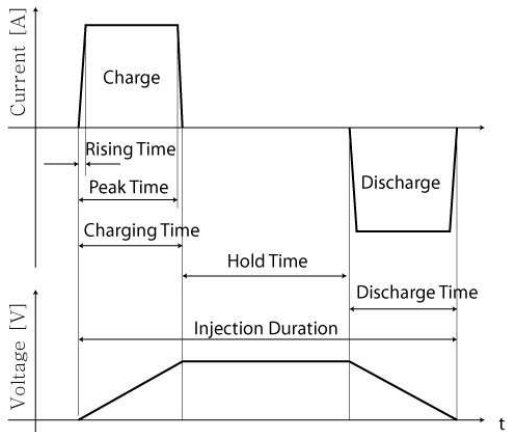
3. 인젝터 내부 동적거동 특성 평가를 위한 해석 변수

본 연구에서는 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 해석 변수로 연료압력, 분공직경, 구동 전압을 선정하였다. 그리고 위 변수에 대한 단분사(single-injection) 조건에서 모델 특성을 해석하였다.

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 신호크기에 따른 응답성을 평가하는 지표가 된다. Table 1의 Parameter는 해석 모델의 기본 값이고 이것을 기준으로 변수를 설정하여 해석하였다. Table 2의 Parameter 중 연료압력과 인젝터의 분공직경별로 솔레노이드와 피에조 인젝터에 대해 해석하였으며, 구동



(a) Solenoid-driven type



(b) Piezo-driven type

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

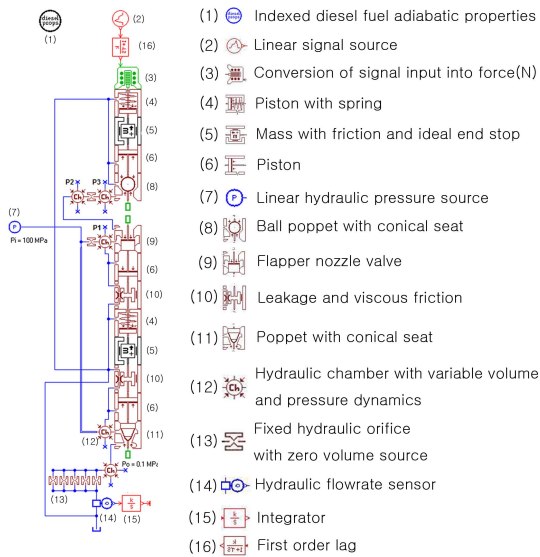
전압은 전압 입력만으로 구동되는 피에조 액추에이터 해석에만 적용하였다. 인젝터 해석모델의 변수는 Table 1의 조건으로 일정하게 하였다.

**Table 1** Basic conditions

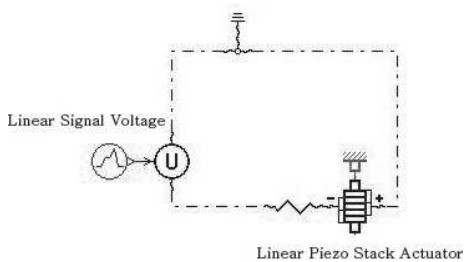
연료압 (bar)	1000
분공경 (mm)	0.168
총 구동 시간 (ms)	0.1
대기압 (bar)	1

**Table 2** Test conditions with main analysis parameter

연료압 (bar)	1000	1500	2000
분공경 (mm)	0.118	0.168	0.218



**Fig. 2** Injector model and parameter



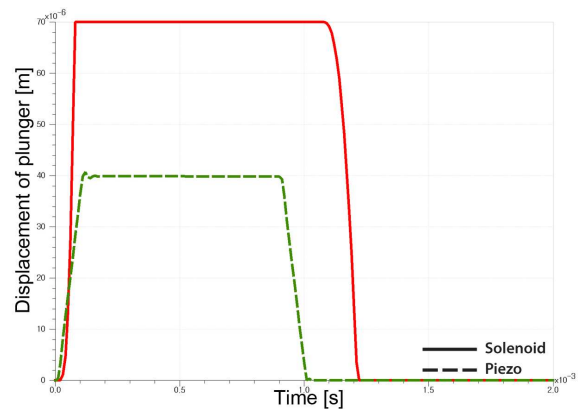
**Fig. 3** Analytic model for driving the piezoelectric actuator

Fig. 3은 피에조 인젝터의 구동부인 피에조 액추에이터의 AMESim 해석모델을 나타낸 것이다.

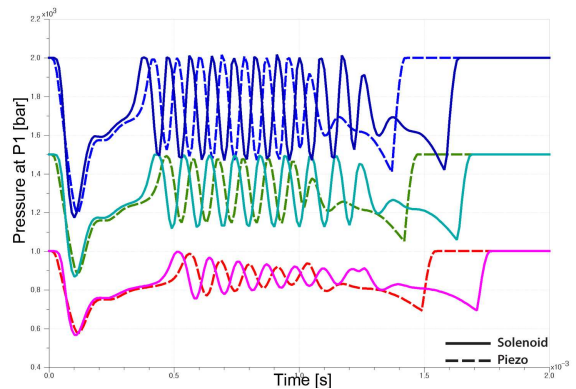
따라서 피에조 인젝터 해석 시, Fig. 2의 솔레노이드 인젝터 해석모델 상단 세 개의 모델로 구성된 솔레노이드 액추에이터와 대체하여 해석하였다.

#### 4. 연구 결과

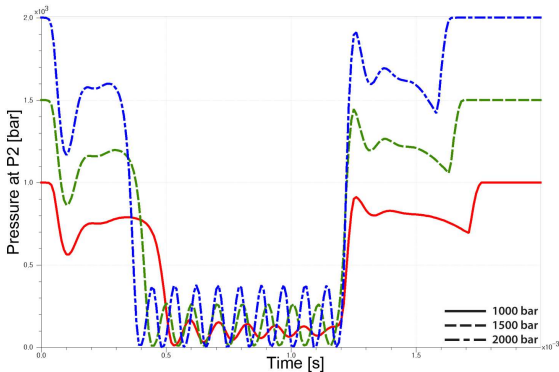
솔레노이드와 피에조 액추에이터의 응답성 비교를 실질적으로 니들을 구동시키는 Fig. 2의 (5) 플런저에 대한 시간-변위 해석결과를 통해 분석하고자, 나타낸 Fig. 4는 Table 1 조건으로 구동된 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 액추에이터에 연결된 플런저 변위를 비교한 것이다. 이를 통해 충·방전 방식으로 구동되는 피에조 스택은 입력신호와 유사한 구동시간을 보이며, 솔레노이드 방식과 비교해 볼 때, 보다 정밀한 변위거동함을 알 수 있었다.



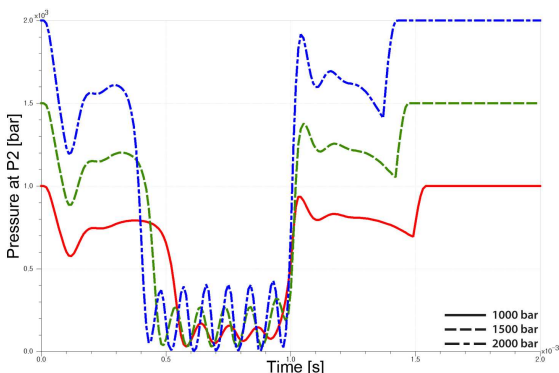
**Fig. 4** Plunger behavior between solenoid and piezo injector



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

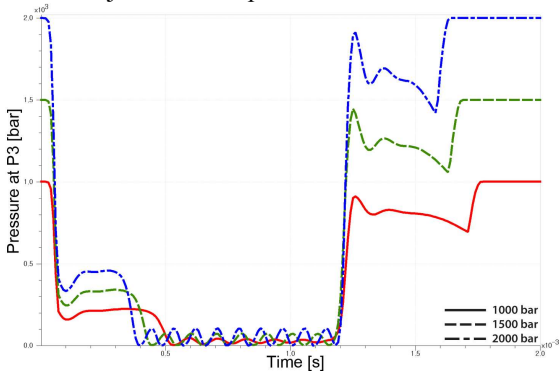


(a) Solenoid injector

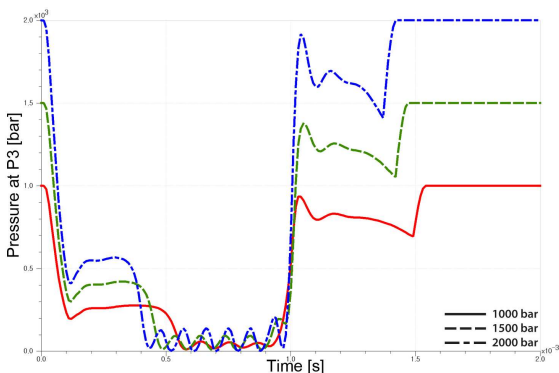


(b) Piezo injector

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



(a) Solenoid injector



(b) Piezo injector

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

Fig. 5는 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 연료압력이 1000 bar, 1500 bar, 2000 bar 일 때, P1지점에서의 압력변화를 나타낸 것이다. 솔레노이드 인젝터의 경우, 분사기간 동안 솔레노이드의 진동기간이 길게 나타나고 압력이 올라갈수록 진동의 폭이 증가함을 알 수 있었다. 이에 비해, 피에조 인젝터의 경우, 압력 변동 기간과 압력회복 기간이 상대적으로 짧음을 알 수 있었다. 이는 충·방전으로 구동되는 피에조 소자의 작동 응답특성의 영향인 것으로 판단된다. 따라서 고압 연료분사의 제어 및 분사안정성 측면에서 볼 때, 피에조 인젝터가 훨씬 유리하며, 이는 결국 피에조 인젝터 니들의 구동 지연시간이 짧음을 의미한다.

Fig. 6은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 연료압력이 1000 bar, 1500 bar, 2000 bar 일 때 P2에서의 압력변화를 나타낸 것이다. 솔레노이드 인젝터의 분사기간이 길고 그만큼 압력변동기간 또한 길었다. 하지만 압력차에 따른 솔레

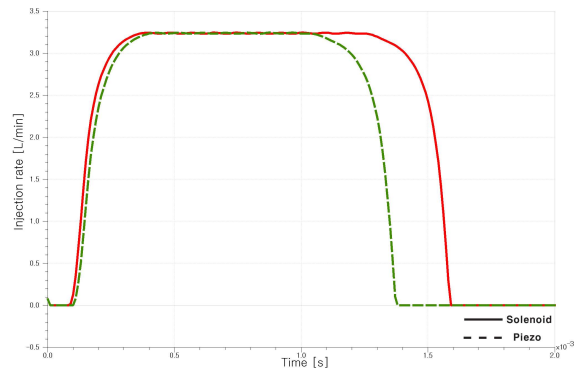


Fig. 8 Injection rate variation between solenoid and piezo injector at 2000bar of injection pressure

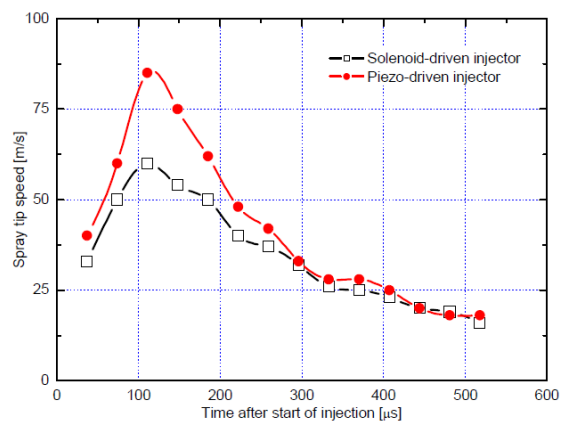


Fig. 9 Experimental comparison with spray speed

노이드와 피에조 인젝터의 변동 패턴은 거의 유사함을 알 수 있었다. 그리고 피에조 인젝터의 압력 변동 기간과 압력회복 기간이 짧다는 것을 알 수 있었는데, 이는 피에조 인젝터의 니들 구동 응답성이 솔레노이드 인젝터보다 빨라져서 궁극적으로 고압으로 구동되는 인젝터 니들 제어에 유리한 것으로 판단된다. Fig. 7은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 연료압력이 1000 bar, 1500 bar, 2000 bar 일 때 P3지점에서의 압력변화를 나타낸 것이다. 연료압력변화에도 불구하고 솔레노이드 인젝터는 분사기간 동안 압력진동 폭이 피에조 대비 작음을 알 수 있었다. 솔레노이드 인젝터의 경우, 초기 구동시 피에조 인젝터에 비해서 압력 강하의 크기가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 연료압력이 2000 bar 일 때 분사를 변화를 나타낸 것이다. 전체 구동시간은 동일하지만 솔레노이드 인젝터의 유동유지 시간이 더 길다는 것을 알 수 있었는데, 이는 피에조 인젝터가 상대적으로 빠른 응답성을 가지는 것을 의미한다(참고문헌2 관련연구결과인 Fig. 9참조).

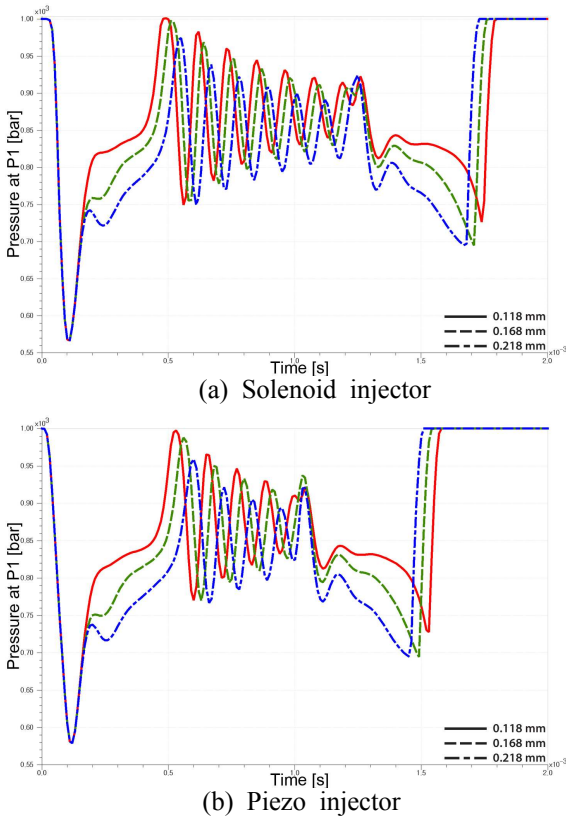


Fig. 10 Effect of injection hole diameter on pressure at P1 position

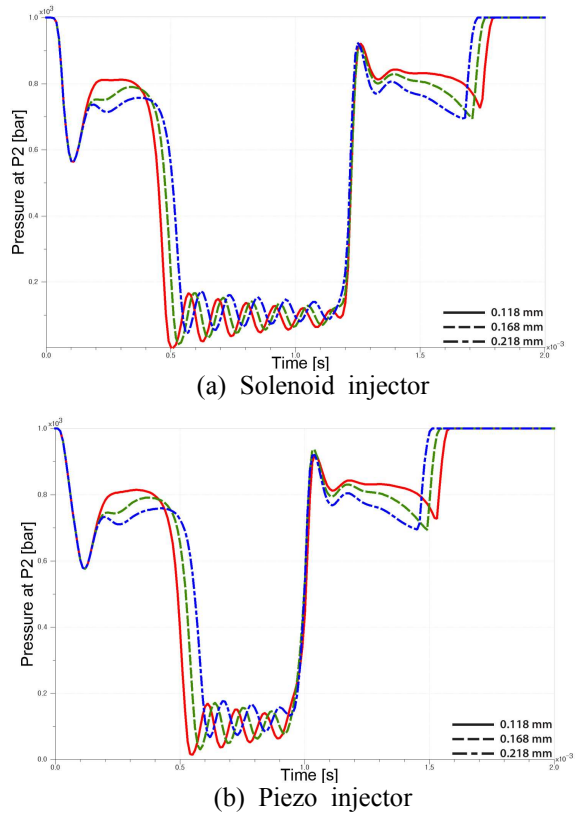


Fig. 11 Effect of injection hole diameter on pressure at P2 position

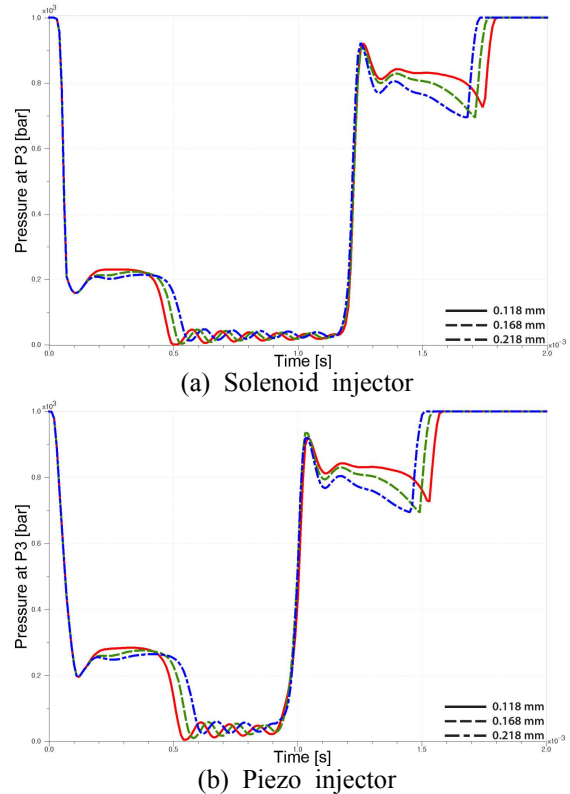


Fig. 12 Effect of injection hole diameter on pressure at P3 position

Fig. 10은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일때, P1지점에서의 연료 압력 변동을 나타낸 것이다. 피에조 인젝터의 경우, 솔레노이드 인젝터에 상대적으로 신속한 압력회복을 알 수 있었다. 반면, 솔레노이드 인젝터는 구동신호 후 일정 지연이 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일때, P2지점에서의 연료 압력 변동을 나타낸 것이

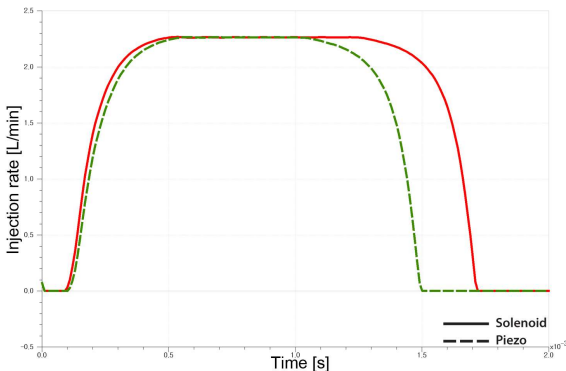
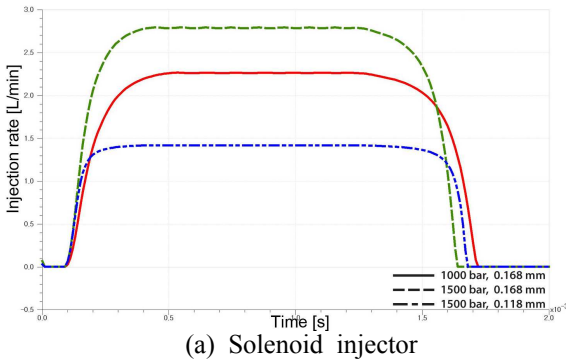
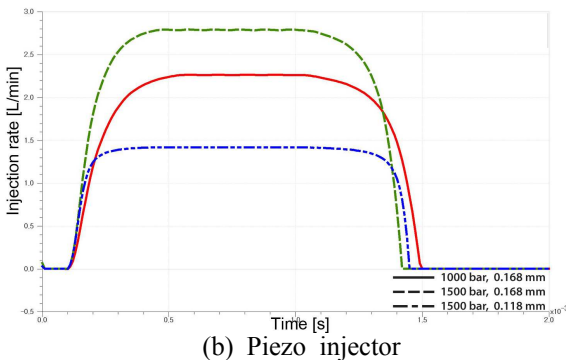


Fig. 13 Effect of injection hole diameter(0.168mm) on injection rate between solenoid and piezo injector at 1000bar of injection pressure



(a) Solenoid injector



(b) Piezo injector

Fig. 14 Effect of Pressure and injection hole diameter on injection rate between solenoid injector and Piezo injector

다. 최대압력강하로 구동하는 기간이 피에조 인젝터의 경우 상대적으로 짧다는 것을 알 수 있었다. 이는 분공경이 증가함에 따라 초기 압력 강하 폭이 증가하여 니들의 빠른 닫힘에 영향을 주어 압력회복시기가 앞당겨지게 된 것으로 판단된다.

Fig. 12는 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168, 0.218 mm 일때, P3지점에서의 연료 압력 변화를 나타낸 것이다. 피에조 인젝터의 압력 하강 시간과 압력 회복 시간이 상대적으로 짧다는 것을 알 수 있었다. 즉, 솔레노이드 인젝터는 초기 압력하강이 급격함을 알 수 있었다.

Fig. 13은 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터 분사 hole의 직경이 0.168 mm 일 때 분사율 변화를 나타낸 것이다. 솔레노이드 인젝터의 분사시간 지연으로 분사율이 0이 되는 시간이 길어져 분사량이 증가함을 알 수 있었다. 하지만 최대 분사량에 도달하는 시간은 피에조 인젝터가 상대적으로 보다 짧음을 알 수 있었다.

Fig. 14는 솔레노이드와 피에조 인젝터에서 연료압력 1000 bar, 1500 bar 때, 분사 hole의 직경이 0.118, 0.168 mm 변화 시 분사율 변화를 나타낸 것이다. 연료압력만 1500 bar로 상승하였을 때, 연료 분사량은 증가하였지만, 연료 분사가 끝나는 시점이 빨라졌으며, 1500 bar 분사 때, 분사 hole 직경이 0.118 mm로 감소하게 되면 큰 분사량 감소가 있지만 연료분사 시점이 미세하게 늦춰짐을 알 수 있었다. 또한 연료압력의 증가로 초기 분사율의 기울기가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 연료압력 상승 및 분사 hole 직경 감소로 정확한 분사량 제어가 되며, 피에조 인젝터의 경우 솔레노이드 인젝터 대비 더욱 정밀한 제어가 가능함을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구는 전자제어기반 커먼레일 분사시스템용 인젝터의 구동부인 솔레노이드와 피에조 스택의 해석모델을 구현하여 상호간의 분사 고속응답 특성을 비교 분석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연료 공급 압력에 따라, 솔레노이드 인젝터는 분사시간이 길어지고 그만큼 압력변동 기간도 증가하여, 피에조 인젝터에 비해 초기 구동



시 압력 강하의 크기가 상대적으로 큼을 알 수 있었다. 이를 통해 피에조 인젝터의 니들 구동 응답성이 솔레노이드 인젝터보다 빨라져서 궁극적으로 고압으로 구동되는 인젝터 니들 제어에 유리한 것으로 판단된다.

(2) 또한, 피에조 인젝터의 최대 분사량 도달 시간이 상대적으로 빠름을 알 수 있었는데, 이는 솔레노이드 인젝터에 비해 상대적으로 신속한 구동을 함을 유추할 수 있었다.

(3) 분공경 변화에 따라 솔레노이드 인젝터는 구동신호 후, 일정 지연이 발생하지만, 피에조 인젝터는 압력 하강 시간과 압력 회복 시간이 상대적으로 짧은 것을 알 수 있었다. 즉, 솔레노이드 인젝터는 분공경이 커질수록 초기 압력하강이 급격함을 알 수 있었다. 이를 통해 분공경 변화에 따른 분사 성능은 상대적으로 피에조 인젝터가 보다 유리한 것으로 판단할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

(1) Pettes, C. and Leipertz, A., 2001, "Potentials of a Piezo-Driven Passenger Car Common Rail System to Meet Future Emission Legislation - An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion," SAE Paper 2001-01-3499.

(2) Lee, J., 2005, "Study on Driving Performance, Spray Characteristics and Cavitation Flow of a Piezo-Driven Diesel Injector," Doctoral Dissertation, Seoul

National University.

- (3) Boehner, W. and Hummel, K., 1997, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles," SAE Paper No. 970345
- (4) Bianchi, G. M., Pelloni, P., Filicori, F. and Vannini, G., 2000, "Optimization of the Solenoid Valve Behavior in Common-Rail Injection Systems," SAE Paper No. 2000-01-2042.
- (5) Hwang, J. W., Kal, H. J., Park, J. K. and Chae, J. O., 1999, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 94~102.
- (6) Lee, J.-W. and Min, K.-D., 2006, "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.
- (7) American National Standard : IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Standard, 1987
- (8) Hountalas, D. T. and Kouremenos, A. D., 1998, "Development of a Fast and Simple Simulation Model for the Fuel Injection System of Diesel Engines," *Advanced in Engineering Software*, Vol. 29, No. 1.
- (9) Bianchi, G. M., Falfari, S., Parotto, M. and Osbat, G., 2003, "Advanced Modelling of Common Rail Injector Dynamics and Comparison with Experiments," SAE 2003-01-0006.
- (10) Chiavola, O. and Giulianelli, P., 2001, "Modelling and Simulation of Common Rail System," SAE 2001-01-3183.