

## 2개 솔레노이드 구동방식별 CRDi용 인젝터의 유압 동특성 해석

이진욱<sup>\*1)</sup> · 이종협<sup>2)</sup> · 김민식<sup>2)</sup>승실대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 승실대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup>

## Analysis of Hydraulic Characteristics of Two Solenoid-driven Injectors for CRDi System

Jinwook Lee<sup>\*1)</sup> · Junghyup Lee<sup>2)</sup> · Minsik Kim<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 12 May 2011 / Accepted 29 June 2011)

**Abstract** : The injection nozzle of an electro-hydraulic injector for the common rail Diesel fuel injection system is being opened and closed by movement of a injector's needle which is balanced by pressure at the nozzle seat and at the needle control chamber, at the opposite end of the needle. In this study, the solenoid actuator was considered as a prime movers in high pressure Diesel injector. Namely a solenoid-driven Diesel injector with different driving current types, as a general method driven by solenoid coil energy, has been applied with a purpose to develop the analysis model of the solenoid actuator to predict the dynamics characteristics of the hydraulic component (injector) by using the AMESim code. Aimed at simulating the hydraulic behavior of the solenoid-driven injector, the circuit model has been developed as a unified approach to mechanical modeling in this study. As this analytic results, we know the suction force and first order time lag for driving force can be endowed in solenoid-driven injector in controlling the injection rate. Also it can predict that the input current wave exerted on solenoid coil is the dominant factor which affects on the initial needle behavior of solenoid-driven injector than the hydraulic force generated by the constant injection pressure.

**Key words** : Solenoid-driven injector(솔레노이드 인젝터), Hydraulic modeling(유압 모델링), High pressure injector(고압 인젝터), AMESim code(AMESim 해석코드), CRDI system(커먼레일 직접분사시스템)

## Nomenclature

L : displacement of needle,  $\mu\text{m}$   
 P : injection pressure, MPa  
 F : output force, N  
 Q : fuel quantity,  $\text{mm}^3$   
 I : current, A  
 t : driving time, ms

## 1. 서론

커먼레일 연료분사시스템(common rail fuel injection system)을 적용한 고압 직접분사식(direct injection) 클린디젤엔진은 매연 후처리장치와 연계하여 세계 주요 선진국 및 자동차회사에서 치열한 기술 개발 경쟁을 벌이고 있는 분야이다.<sup>1,2)</sup> 이에 적용되는 커먼레일 연료분사시스템의 주요 특징은 엔진회전수와 부하에 관계없이 고압 연료공급압력과 인젝터를 통한 분사압력을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 매우 짧은 분사 기간 내 고압 분사 제어를 통해 다단 분사(multiple injection)를 수행할 수 있어 엔진소음

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

및 질소산화물(NOx)을 저감할 수 있다.

아울러 직접 분사식 클린디젤엔진은 광범위한 엔진 운전 범위를 가지기에 넓은 운전 범위에 자유롭게 적용 가능한 분사 시기 및 분사 압력 그리고 분사 시간의 제어를 위한 인젝터의 고 응답성이 필요하다.<sup>3,4)</sup>

또한 직접 분사식 클린디젤 엔진이 고속 소형화됨에 따라 니들 구동용 전류 및 전력의 소비를 적게 하여, 실제 엔진에서의 다단 분사 세분화가 중요하다. 이는 유해 배기 배출물질과 소음 및 진동을 저감하기 위함일 뿐 만 아니라, 현재 활발히 연구 중인 디젤 후처리 기법 및 장치 등과의 효율적인 매칭을 통한 엔진 최적화에 있어서 필수적이기 때문이다.

이를 위해 동적 부하 응답성과 반복적이고 정확한 연료분사를 위해 전자적으로 제어되는 커먼레일 연료분사시스템용 솔레노이드 구동 인젝터(solenoid-driven injector)에 대한 체계적 분석이 요구되는 실정이다.<sup>5-8)</sup>

따라서 본 연구에서는 직접분사식 디젤엔진의 커먼레일 연료분사시스템에 적용 중인 솔레노이드 인젝터의 서로 다른 구동방식별 기본적인 기계적 작동 성능특성을 수치적으로 분석하고자 인젝터 내부의 유압 동특성 해석을 수행하였다. 이를 위해 고 응답성과 자유도가 높은 제어 성능을 가지는 솔레노이드 액츄에이터의 해석 모델 설정 및 검증 및 솔레노이드 인젝터의 각 구성 요소들 간의 최적 구동을 위한 수학적 모델 설정 그리고 서로 다른 인가전류 방식별 구동특성을 해석하였다.

## 2. 솔레노이드 인젝터의 구동 특성

인젝터 내부의 솔레노이드는 전자기 유도 소자(inductive load)인 코일로 만들어지고, 코일에 전압을 인가하면 전류는 시간이 지남에 따라 서서히 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해 코일에 더 높은 전압을 인가하여 전류 상승시간을 줄여야 한다.

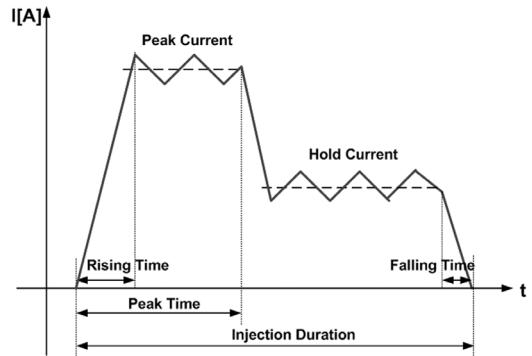
따라서 초기 상승 전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치가 필요하다. 이렇게 솔레노이드 코일에 고전류가 인가되면서 인젝터는 신속하게 작동되며, 이와 동시에 인젝터 초기 작동에 인가되었던 높은 전류는 낮아지면서 지속적으로 솔레노이드에 전

류가 인가된다.

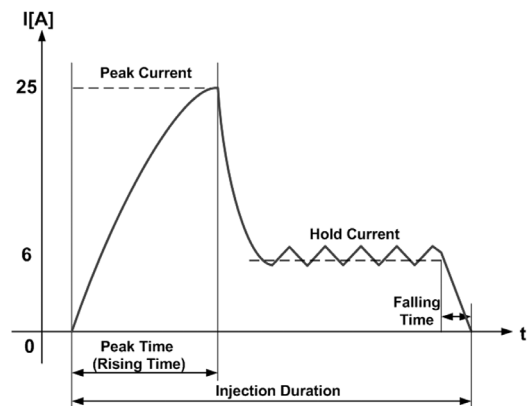
즉, 인젝터 작동 전체기간 동안에는 구동 인가 전압이 ON/OFF상태로 펄스폭을 조절(pulse width modulation, PWM)하면서 낮은 저항 값을 가지는 코일 특성으로 인해 피크 전류 및 홀드 전류를 제어하게 된다. 이처럼 솔레노이드 코일은 낮은 저항 값을 가지는 반면에, 전류 변화에 대한 전자기 유도에 의해 생기는 유도 기전력의 비를 나타내는 유도계수인 인덕턴스는 크다.

또한 최대 소요 전류는 솔레노이드 밸브와 코일 설계시 결정되며, 인젝터 작동 전체 기간에 전류를 필요(전류 소비)로 하기에, 전력 소모가 많을 뿐만 아니라, 열로 손실되는 전력 손실도 많다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 2개 솔레노이드 인젝터의 구동 전류파형을 나타낸 것이다.



(a) Driving current : Type A



(b) Driving current : Type B

Fig. 1 Driving current wave of two solenoid-driven injectors with different driving current method

Fig. 1(a)와 (b)에서 보듯이 솔레노이드(solenoid)에 의해 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식의 경우, 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.

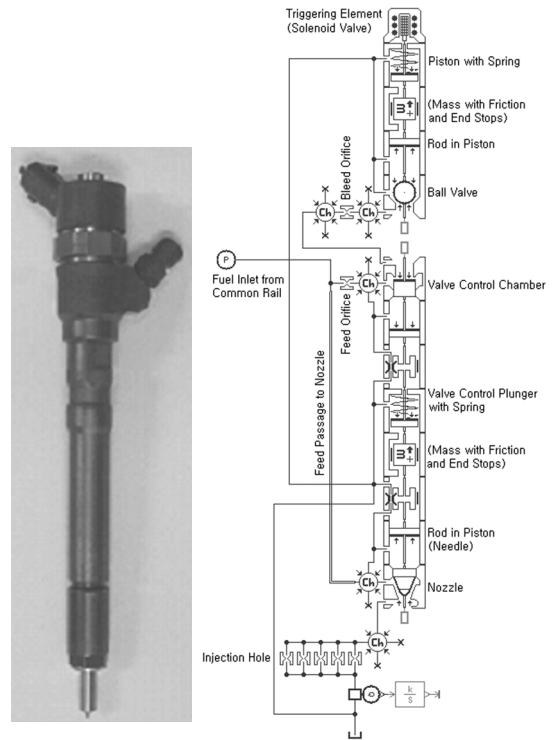
상대적으로 저항과 인덕턴스가 작은 Fig. 1(b)는 구동 초기에 25A의 고전류로 인젝터를 구동하지만, 전류 상승시간에 있어서는 Fig. 1(a)와 차이를 보이고 있다. 일반적으로 솔레노이드 인젝터를 구동하기 위해서는 차량 전원(battery)에서 공급되는 12V의 전압만으로는 100 $\mu$ s 이내에서 20A까지 구동 전류를 상승시키는 것은 불가능하기 때문에, 더 높은 전압을 인가하여 솔레노이드의 전류를 증가시키고 전류 상승시간을 줄여야 한다. 따라서 초기 상승 전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치(charge pump)가 필요하게 된다.

### 3. 인젝터 내부 유압 모델링

본 연구에서는 솔레노이드 인젝터의 기본적인 작동 성능 해석을 수치적으로 검증하기 위하여, 신뢰성이 검증된 상용 AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation) 코드를 사용하여 수학적 모델을 정립한 후, 유압 해석을 수행하였다. 이 해석 방법은 인젝터 시스템의 설계 초기단계 및 설계과정에서 성능 검증과 향상을 도모할 수 있으며, 또한 설계 및 개발시간을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2(b)는 솔레노이드 인젝터의 유압 해석 모델을 나타낸 것인데, 이는 Fig. 2(a)의 실제 솔레노이드 인젝터(Bosch社)와 동일한 구성도를 가진다.

본 연구에 적용된 디젤연료의 밀도, 체적계수 그리고 음속은 단일 조건이며, 일반 표준 사양인 ISO 4113 연료를 적용하였다. 해석시간을 부여하는 신호는 선형적으로 최대 8단계로 구성되었으며, 이 입력신호는 출력으로 변환되게 된다. 이 힘은 바로 아래 부분에 위치한 스프링을 가진 피스톤에 전달되어, 일정 변위(0.07 mm) 및 일정 질량(7.1 g)을 갖는



(a) Real injector (b) Injector equivalent hydraulic circuit  
Fig. 2 Schematic of the electro-hydraulic injector

질량체(mass with friction and ideal end stops)를 경유하여 하단 피스톤에 적용하게 된다.

또한 커먼레일로부터 일정하게 공급되는 압력은 고압 연료 파이프( $\varnothing=2\text{mm}$ ,  $l=150\text{mm}$ )를 통해 하단 feed orifice를 지나, 제어실에 채워지게 된다. 이러한 기계-유압적인 힘의 평형은 볼 밸브(ball poppet with conical seat)에 의해 유지된다.

그리고 인젝터 노즐에 대한 모델은 원추형 시트를 가지는 원뿔형 포핏 밸브(spherical poppet valve)의 1차원 운동 모델로 고려하였다.

그리고 본 연구에 적용된 솔레노이드 인젝터는 5개의 노즐 분공을 가지는데, 1개 분공의 직경은 0.168 mm이며, 오리피스로 모델링할 수 있었다.

그리고 솔레노이드 인젝터의 구동전류 방식 변화에 따른 유압적 동특성을 비교 해석하고자, 솔레노이드 인젝터의 핵심인 솔레노이드 코일 구동부에 대한 해석 모델을 수립하였는데, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 이를 통해 궁극적으로 다양한 시험조건에 대한 솔레노이드 인젝터의 기계적 구동 특성을 유

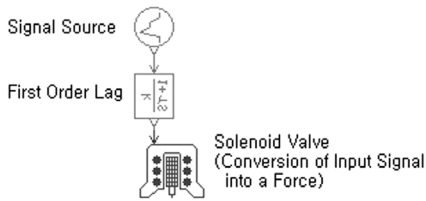


Fig. 3 Analytic model for driving the solenoid actuator

압적으로 해석할 수 있었다.

이 해석 모델에서는 솔레노이드의 입력 신호를 전류신호(current force signal)로 부가하였는데, 여기서는 흡입력이기 때문에 1차 지연요소를 사용하여 게인 값을 -100으로 설정하였다. 이는 통전된 솔레노이드 코일에 의해 전기에너지가 자기 에너지로 변환되며, 코일에는 변환된 자기 에너지가 축적되어, 결국에는 힘(구동력)을 발생시키게 되는 과정을 모사하게 된다.

#### 4. 해석 결과

본 연구에서는 직접분사식 클린디젤엔진용 솔레노이드 인젝터에 대한 구동 성능의 해석을 위해, 먼저 서로 다른 두 가지 전류 파형을 입력신호로 구분하여 솔레노이드의 초기 흡인력을 부가하였다. 이를 통해 솔레노이드에 의한 자기력과 스프링력 및 압력차에 의한 힘이 작용하게 된다.

그리고 솔레노이드 인젝터의 동적 모델을 검증하기 위해서, 일정하게 공급되는 분사 압력 100 MPa와 구동기간 1.0 ms에 대한 2가지 솔레노이드 구동 입력 전류 신호별(Type A, Type B) 해석 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

해석 결과를 기술하기 앞서, 본 해석에 적용된 두 가지 입력 전류 신호의 특징을 살펴보고자 한다.

Type A 입력 전류 파형은 Type B보다 저항과 인덕턴스가 크고, 구동 전류가 서로 다른 특징이 있다. 반면, Type B 전류 입력신호는 인젝터의 저항과 인덕턴스가 매우 작아서, 즉 코일의 감긴 횟수가 적게 되어 인젝터 구동시, 초기 상승전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치를 사용하지 않은 솔레노이드 인젝터에 주로 적용되고 있다. 따라서 이 경우, 200 μs 이내에 25 A를 구동할 수 있는 특징이 있다. 다시 말해, Type B 전류 입력신호는 솔레노이드의 지연

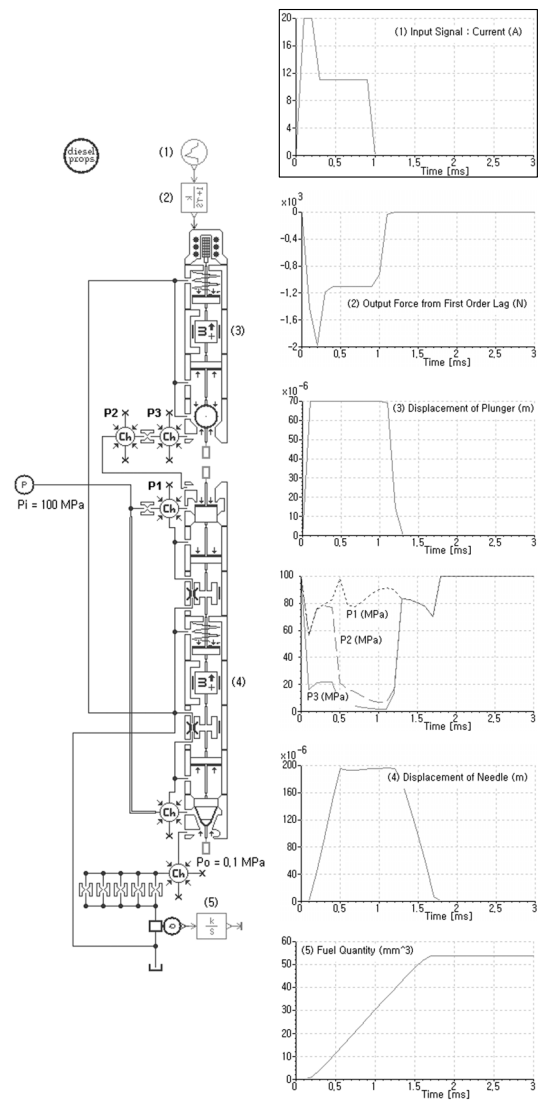


Fig. 4 Hydraulic behavior and injection characteristics in solenoid-driven injector with input current (Type A)

시간을 감소하기 위한 방법인 코일의 인덕턴스 감소를 통해 동일 입력 전압에서 전류를 상승시키게 되는 경우에 해당된다.

본 연구에 사용된 해석 모델에서는 이러한 전기적인 소자 사양들의 변경을 감안해서 전류 입력신호를 설정하는 것에는 제한되기 때문에, 단지 솔레노이드의 흡인력과 인젝터의 동특성을 반영하는 실제 서로 다른 전류 입력신호에 대한 영향을 해석하는데 중점을 두었다.

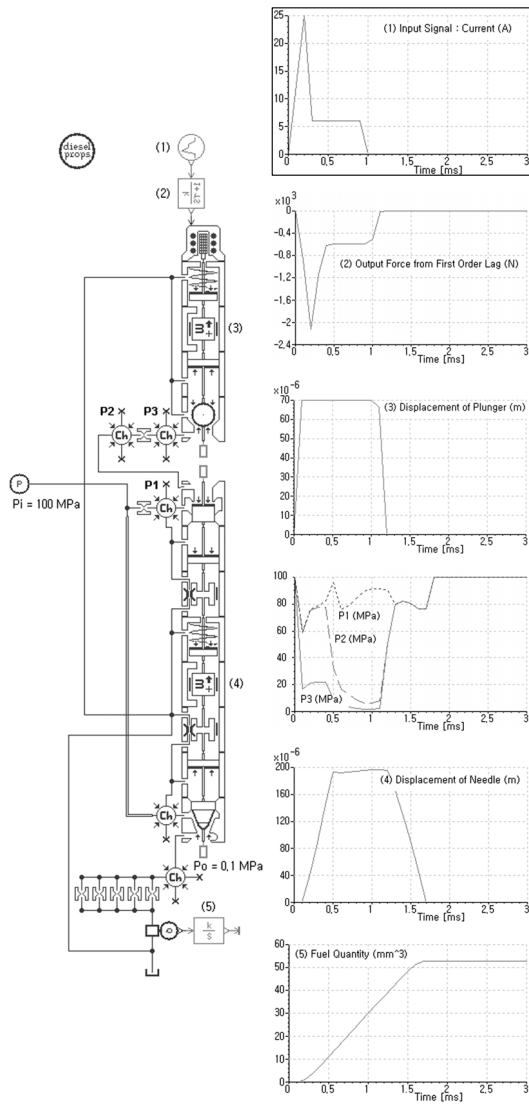
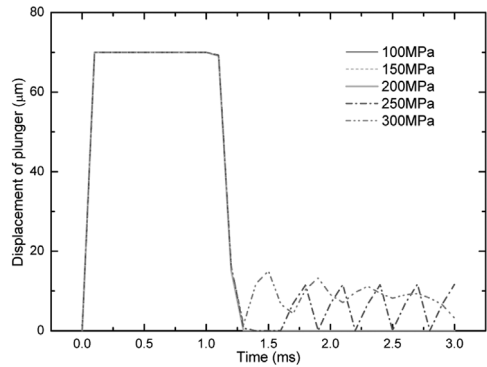


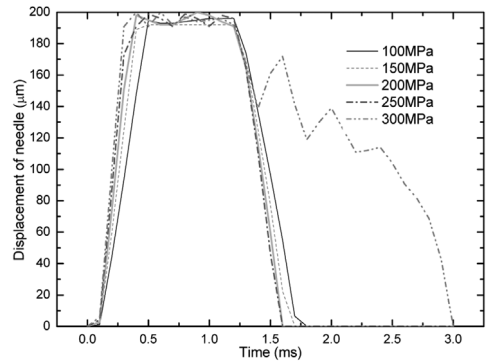
Fig. 5 Hydraulic behavior and injection characteristics in solenoid-driven injector with input current (Type B)

먼저, 솔레노이드 인젝터에 있어서 Type A 전류 입력신호에 대한 1차 시간 지연에 따른 출력, 솔레노이드 구동 플런저의 변위, 그리고 플런저 변위에 대한 두 개 오리피스 부근의 압력 변화, 니들 변위, 그리고 연료 분사량 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

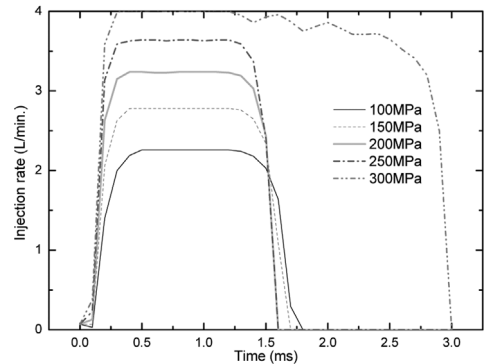
본 연구에 적용된 솔레노이드에 작용하는 힘은 흡입력이기 때문에, 구동력의 전달함수로서 1차 지연 요소(first order lag)를 적용하였다. 이의 시정수(time constant)는 지연 요소로 작용하기 때문에, 이



(a) Plunger driven by solenoid



(b) Needle

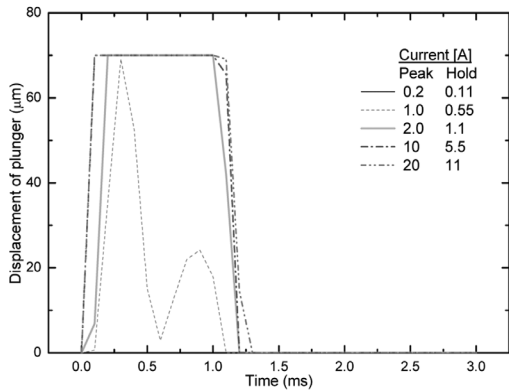


(c) Injection rate

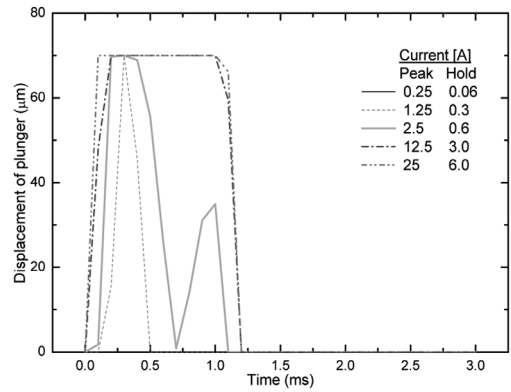
Fig. 6 Effects on the injection pressure in solenoid-driven injector with input current (Type A)

값을 크게 할수록 응답성이 저하된다. 따라서 진동 및 관성이 큰 부하로 적용되지 않는 본 연구에서는 이 값을 30  $\mu$ s로 낮게 설정하였다.

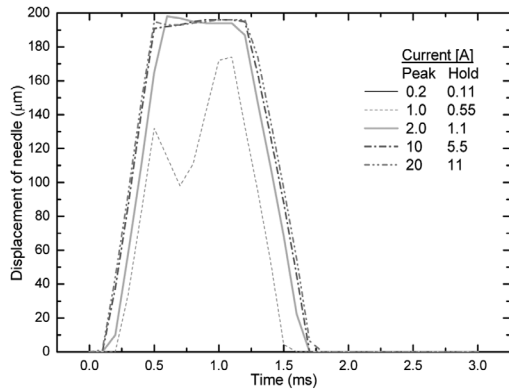
반면에, 이동 위치 결정 완료 시간을 짧게 하기 위해서 게인 값은 -100으로 높게 설정하였다. 이를 통해 구해진 플런저의 변위는 가장 이상적 형태를 나



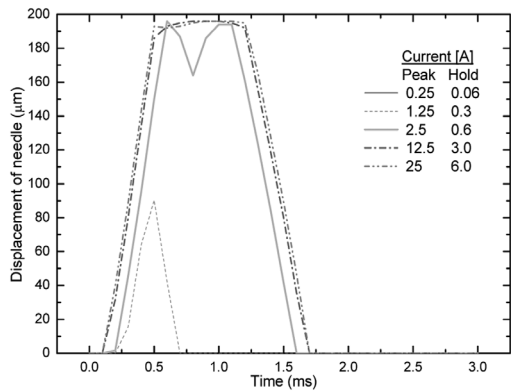
(a) Plunger driven by solenoid



(a) Plunger driven by solenoid



(b) Needle



(b) Needle

Fig. 7 Effects on the various input currents in solenoid-driven injector with input current (Type A)

Fig. 8 Effects on the various input currents in solenoid-driven injector with input current (Type B)

타법을 알 수 있다. 특히 플런저가 최대 변위지점까지 이동하는데 발생하는 초기 상승시간의 지연으로 인하여, 전체 작동기간이 실제 입력 기간보다 길어짐을 알 수 있다. 또한 하강시간 역시 약간의 지연시간이 존재함을 알 수 있다. 그리고 플런저 변위의 영향을 직접 받는 P3지점에서의 압력강하가 가장 급격히 일어나며, 볼 밸브의 열림과 닫힘 시작 구간내에서 유압 변동이 일부 존재하게 됨을 알 수 있다.

물론 유사한 플런저 변위로 인해 Type B 전류 입력 신호인 경우인 Fig. 5와 비교 시, 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Type A 전류 입력신호에 대하여 일정하게 공급되는 분사 압력에 따른 민감도 해석 결과이다. 분사 압력은 100 MPa에서 300 MPa까지 50 MPa씩 변화시켜 플런저 변위, 인젝터 니들 변위 그리고

분사율의 거동 특성을 비교하였다. 솔레노이드 밸브의 변위에 해당되는 상단 플런저의 구동 특성상 200 MPa이상으로 작동하는 것은 적합하지 않음을 알 수 있다. 특히 분사압력이 300 MPa인 경우, 솔레노이드 구동부와 상단 플런저의 설계사양으로 인해, 실제 정상적인 분사 실현은 불가능함을 유추할 수 있었다.

이상의 결과로부터 솔레노이드 인젝터 유압 해석 시물레이션시, 솔레노이드 인젝터의 초기 구동력을 부여할 경우, 1차 지연요소를 적용함으로써, 가장 이상적인 플런저 변위 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

물론 해석 코드의 한계로 인해 솔레노이드 코일의 전기적 특성에 대한 영향을 고려할 수 없어, 솔레노이드 인젝터 구동의 주요 변수인 서로 다른 전류

입력신호의 특성을 비교한 경우, 해석적 차이점은 없으나, 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 1차 지연 요소의 출력 값 즉, 솔레노이드 밸브의 구동력을 실험적으로 구한 후, 본 해석 적용하게 될 경우, 실제적인 플런저 변위 특성을 얻을 수 있을 것으로 판단이 된다.

따라서 본 연구에서는 이들의 영향을 살펴보기 위해 Fig. 7, 8과 같이 5가지 구동 전류를 각각 Type A와 B에 대해 적용한 후, 인젝터 플런저 및 니들의 변위 거동 특성을 비교해 보았다.

구동 전류별 영향은 Fig. 7의 Type A인 경우가 Type B보다 상대적으로 적음을 알 수 있으며, 이 Type A의 경우에는 기본 최대 전류인 20 A의 10%값인 2 A에서도 정상적인 작동이 됨을 알 수 있었다. 이는 분사 압력이 100 MPa인 경우에 유효한 것으로써, 이 보다 큰 분사 압력에서의 안정적 분사를 위해서는 더 높은 전류를 필요로 하게 된다.

반면, Fig. 8의 Type B와 같은 입력 전류 파형은 초기 전류 값에 따라 플런저의 변위가 상대적으로 민감하게 변하게 됨을 알 수 있어, 실제 인젝터에 적용시 보다 정확한 제어가 필요함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구는 커먼레일 연료분사시스템용 솔레노이드 인젝터의 다단 분사 및 고 응답 분사특성을 향상시키기 위한 인젝터 구동 성능을 수치적으로 분석하고자, 실제 사양과 동일한 솔레노이드 인젝터의 내부 유압적 동특성을 해석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 솔레노이드 인젝터의 핵심부인 솔레노이드 구동부의 수학적 해석 모델을 상용 AMESim코드를 사용하여 수립하였으며, 초기 구동력을 부여할 때, 흡인력의 모사 및 1차 지연요소를 적용하면 가장 양호한 플런저 변위 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 그리고 실제 입력 전류 파형을 기준해서 다양한 솔레노이드 밸브의 변위를 생성한 후, 이를 비교 해석한 결과, 구동전류의 피크와 홀드의 사양에 따라 인젝터 니들과 플런저의 거동 차이가 민감함을 알 수 있었다. 이는 구동전류 변화에 따라 플런저 변위의 영향을 직접 받는 지점에서의 압

력강하 정도와 볼 밸브의 열림과 닫힘 시작 구간 내 유압 변동값의 영향인 것으로 사료된다.

- 3) 또한 본 유압해석을 통해 상대적으로 높은 피크 전류값을 가지지만, 피크 전류에 도달하는 시간이 상대적으로 긴 입력 전류파형인 경우(Type B 해당), 보다 정확한 제어가 필요함을 알 수 있었다.
- 4) 실제 솔레노이드 인젝터와 동일한 기계적 사양을 가진 인젝터 해석 모델을 수립하여 유압 해석한 결과, 솔레노이드 밸브의 변위에 해당되는 상단 플런저의 구동 특성상 분사 압력 200 MPa이상으로 작동하는 것은 적합하지 않음을 알 수 있었다. 이는 적용된 시스템의 실제 설계 사양과 비교해볼 때, 매우 합리적인 결과임을 알 수 있었다.

## 후 기

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

## References

- 1) G. M. Bianchi, P. Pelloni, F. Filicori and G. Vannini, "Optimization of the Solenoid Valve Behavior in Common-rail Injection Systems," SAE 2000-01-2042, 2000.
- 2) W. Boehner and K. Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles," SAE 970345, 1997.
- 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) J. W. Hwang, H. J. Kal, J. K. Park and J. O. Chae, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.94-102, 1999.
- 5) J. Mooney, "Drive Circuit Modeling and Analysis of Electronically Controlled Fuel Injectors for Diesel Engines," SAE 2003-01-3361, 2003.
- 6) O. Chiavola and P. Giulianelli, "Modelling and Simulation of Common Rail System," SAE

- 2001-01-3183, 2001.
- 7) J. Mooney, "Drive Circuit Modeling and Analysis of Electronically Controlled Fuel Injectors for Diesel Engines," SAE 2003-01-3361, 2003.
- 8) K. H. Sung, S. B. Park, M. H. Sunwoo and H. K. Na, "A Study on the Model of an HSDI Common-rail Injector and the Estimation of Needle Lift," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.59-61, 2002.