

## HSDI 커먼레일 인젝터 동적 모델 및 분사율 추정

남 기 훈 · 박 승 범 · 선 우 명 호\*

한양대학교 자동차공학과

### Dynamic Model of an HSDI Common-rail Injector and Injection Rate Estimation

Kihoon Nam · Seungbum Park · Myoungho Sunwoo\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(Received 28 March 2003 / Accepted 19 May 2003)

**Abstract** : The common-rail fuel injection system is becoming a common technology for High Speed Direct Injection(HSDI) diesel engines. The injection timing and rate are important factors for combustion control and pollutants formation mechanisms during engine operation. This paper introduces an estimation methodology of the injection timing and rate of a common-rail injector for HSDI diesel engines. A sliding mode observer that is based on the nonlinear mathematical model of the common-rail injector is designed to overcome the model uncertainties. The injector model and the estimator are verified by relevant injection experiments in an injector test bench. The simulation and the experimental results show that the proposed sliding mode observer can effectively estimate the injection rate of the common-rail injector.

**Key words** : HSDI(고속직분식), Common-rail(커먼 레일), Injector(인젝터), Injection rate(분사율), Sliding mode observer(슬라이딩 관측기), Solenoid(솔레노이드)

#### Nomenclature

- $A$  : area,  $m^2$
- $b$  : damping coefficient,  $Ns/m$
- $F_{mag}$  : magnetic force,  $N$
- $k$  : spring constant,  $N/m$
- $K$  : sliding gain
- $m$  : mass,  $kg$
- $P$  : fuel pressure,
- $Q$  : volumetric flow rate,  $m^3/s$
- $\beta$  : bulk modulus of compressibility of fuel,  $N/m^2$

#### 1. 서론

최근 사회적으로 대두되고 있는 대기오염문제는 CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, PM, 및 SO<sub>x</sub> 등의 오염물질에 기 인하며, 이러한 오염 물질은 자동차에서 배출되는 배기가스가 큰 비중을 차지한다. 특히 디젤 차량의 유해 배기가스 문제는 더욱 심각하여 세계 각국은 디젤 차량의 배기규제를 대폭 강화하고 있다. 미국의 경우 현재 시행중인 연방규제가 2004년 이후 대 폭 강화될 예정이며, 유럽연합도 Euro IV, Euro V를 통해 배기규제가 더욱 강화될 것으로 예상된다. 국 내의 경우에도 1984년부터 디젤 차량에 대한 배출 가스 규제를 시행하였고, 수차례의 개정을 거쳐 NO<sub>x</sub>와 PM의 배출 규제를 강화하여 왔다. 따라서 향

\*To whom correspondence should be addressed.  
msunwoo@hanyang.ac.kr

후 강화되는 배기규제 대응 및 환경 친화적인 디젤 차량을 개발하기 위하여 디젤 기관에 관한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 고속직분식(HSDI) 커먼레일 연료분사 시스템은 저공해, 고효율 및 고출력의 디젤 기관으로서 제안된 시스템이다. 이 방식의 이점은 압력 발생부와 연료분사계가 분리되어 있기 때문에 연료분사압력이 엔진 회전속도와 분사량에 무관하게 유지될 수 있고, 고압 연료 분사에 의한 양질의 혼합기 형성으로 입자상 물질을 감소시킬 수 있으며, 파일럿분사와 포스트분사가 가능하여 소음 및 질소산화물을 저감시킬 수 있다는 점이다. 이와 같이 커먼레일 연료분사 시스템은 기존의 기계식 연료분사시스템에 비하여 많은 장점을 가지고 있으며, 전자제어를 통한 최적의 분사시기 및 분사량의 조절이 가능하여 폭넓은 운전 영역에서 정밀한 제어가 가능하다. 따라서 최근 고속직분식 커먼 레일 분사 시스템의 적용이 날로 확대되는 추세이다.<sup>1,2)</sup>

이 연구는 커먼레일 연료분사 시스템에서 연료 분사량 및 분사시기의 되먹임제어(feedback control)를 위한 기초연구로서, 인젝터에 대한 동적 모델을 수립하였고, 비선형 관측기를 이용하여 분사 시기 및 분사를 추정 알고리즘을 제시하였으며, 인젝터 성능 시험기를 이용한 실험을 통하여 관측기의 성능을 검증하였다.

## 2. 커먼 레일 연료분사 시스템

### 2.1 연료분사계 구성

커먼 레일 연료분사시스템은 일반적으로 고압 발생을 위한 고압 펌프, 고압 연료를 축적하는 커먼레일, 전자 제어식 인젝터, 각종 센서 및 압력 조절 밸브와 전자 제어장치(ECU) 등의 요소로 구성된다. Fig. 1은 커먼 레일 연료분사 시스템의 개략도를 나타낸다. 기관의 구동력으로 작동되는 고압 펌프에 의해 고압의 연료가 커먼 레일에 저장되며, 전자제어 장치의 신호에 의하여 인젝터를 통해 실린더 내로 분사된다. 레일은 일정 압력의 연료를 고압 파이프를 통해 인젝터로 공급하며, 연료 축압 기능과 압력파를 감쇠하는 역할을 한다. 인젝터는 ECU에 의해 전자제어 방식으로 구동되므로 커먼레일 연료분사시스템은 다중 분사(multi-injection)가 가능하며,

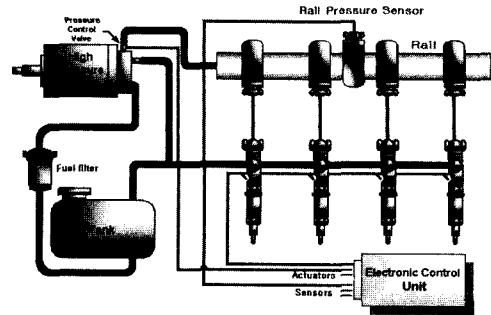


Fig. 1 Common-rail fuel injection system

각 엔진 사이클당 분사 시기가 조절되어 보다 유연한 분사율 제어를 실현할 수 있다.

### 2.2 커먼 레일 인젝터의 작동원리

운전조건에 따른 분사율 측정실험 및 인젝터의 동적 모델링을 위하여 독일 보쉬사에서 제작한 2-웨이 밸브(2-way valve) 방식의 커먼 레일용 인젝터를 사용하였다. Fig. 2는 이 연구에서 사용한 커먼 레일 인젝터의 작동 원리를 도시한 그림이다.

전자제어 장치에 의해 솔레노이드가 ON 상태가 되면, 솔레노이드의 자기력에 의해 아마추어(armature)가 상승하여 출구 오리피스가 열리게 되며, 이 순간 압력 제어실의 압력은 입구와 출구 오리피스의 유량비에 따라 결정되는 압력으로 떨어지게 되고, 축압실(accumulator chamber)과 제어실(pressure control chamber)의 압력 차에 의해 니들 밸브가 열리면서 분사가 개시된다.

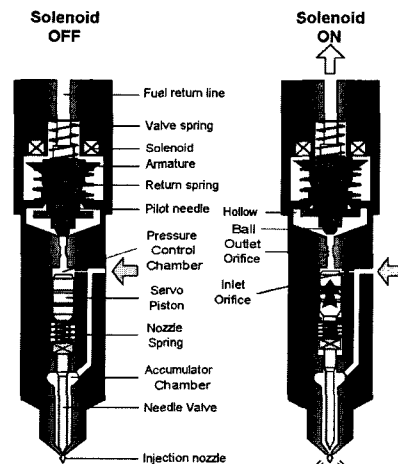


Fig. 2 Operation of a common-rail injector

### 3. 커먼 레일 인젝터 모델링

연료 분사과정의 동역학은 매우 복잡하나, 인젝터 자체에만 한정하여 다음의 가정 하에 인젝터의 모델을 유도하였다.<sup>3,6)</sup>

- 공급압력의 맥동 현상은 무시한다.
- 축압실의 압력은 공급압력과 같다.
- 리턴 압력은 대기압과 같다.
- 가동부의 마찰은 무시한다.
- 제어실 내의 연료는 압축성이다.
- 분사시 실린더 내의 압력은 일정하다.

인젝터의 동적 모델은 솔레노이드 양단의 전압을 입력으로 하고, 솔레노이드 구동전류를 출력으로 하는 단일 입·출력 시스템으로서 솔레노이드, 아마추어, 홀로우 챔버, 압력 제어실, 서보피스톤, 니들 밸브와 Sac 챔버로 구성된다.

#### 3.1 인젝터 모델 구성

##### 3.1.1 솔레노이드 (Solenoid)

Kirchhoff의 전압법칙에 의해 솔레노이드에 작용하는 전압,  $V$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = iR + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 구동전류,  $R$ 은 코일 저항,  $\lambda$ 는 코일의 쇠교 자속(flux linkage)을 각각 나타낸다.  $\lambda$ 는 코일의 구동전류( $i$ )와 아마추어 변위( $x_a$ )의 함수로 표현되며, 실험에 의해 구할 수 있다.  $\lambda$ 의 편미분을 포함한 형태로 식 (1)을 다시 쓰면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V &= iR + \frac{\partial \lambda(i, x_a)}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda(i, x_a)}{\partial x_a} \cdot \frac{dx_a}{dt} \\ &= iR + L(i, x_a) \frac{di}{dt} + E(i, x_a) \frac{dx_a}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 전류의 시간변화율은 식 (3)과 같다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - iR - E(i, x_a) \frac{dx_a}{dt}}{L(i, x_a)} \quad (3)$$

##### 3.1.2 아마추어 (Armature)

아마추어는 솔레노이드의 흡인력에 의해 구동되면서 출구 오리피스를 개폐하여 압력제어실의 압력을 조절하는 역할을 하며, 솔레노이드에 의한 자기

력과 스프링력 및 압력차에 의한 힘이 작용한다. 아마추어의 거동에 대한 지배방정식은 식 (4)와 같다.

$$m_a \ddot{x}_a = A_a \Delta P_i + F_{mag} - m_a g \cos \theta - F_{sv} - F_{sr} - b_a x_a \quad (4)$$

여기서,  $A_a$ 는 볼의 단면적,  $\Delta P_i$ 는 홀로우 챔버 압력과 대기압의 차이,  $F_{mag}$ 는 솔레노이드 흡인력,  $F_{sv}$ 는 아마추어 변위에 따른 밸브스프링에 의한 힘,  $F_{sr}$ 은 아마추어 변위에 따른 리턴 스프링에 의한 힘,  $m_a$ 는 아마추어부 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $x_a$ 는 아마추어 변위,  $\theta$ 는 인젝터의 장착각도를 각각 나타낸다.

##### 3.1.3 압력제어실 (Pressure control chamber)

압력 제어실의 압력은 솔레노이드가 OFF 상태인 경우 레일 압력과 같은 상태가 되며, ECU에 의해 솔레노이드가 ON 상태가 되면, 솔레노이드의 자기력에 의해 아마추어가 상승하여 입구와 출구 오리피스의 유량 비에 따른 압력으로 결정된다. Fig. 3과 같이 단순화된 압력제어실의 모델에 연속방정식을 적용하면, 식 (5)와 같이 압력 제어실의 압력에 대한 미분 방정식을 유도할 수 있다.

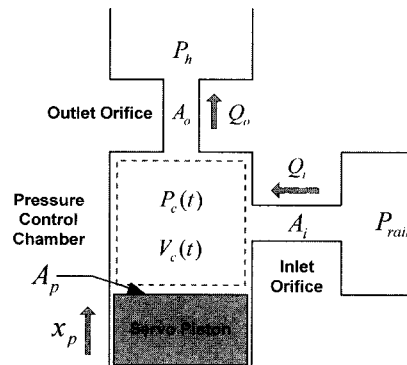


Fig. 3 Schematic diagram of a pressure control chamber

$$\begin{aligned} \dot{P}_c &= \frac{\beta_f}{V_c} (\dot{Q}_i - \dot{Q}_o - \dot{V}_c) \\ &= \frac{\beta_f}{V_{c0} - A_p x_p} (\dot{Q}_i - \dot{Q}_o + A_p \dot{x}_p) \end{aligned} \quad (5)$$

##### 3.1.4 홀로우 챔버 (Hollow chamber)

압력 제어실로부터 출구 오리피스를 통과한 연료는 홀로우 챔버를 통과하여 연료탱크로 되돌아가

며, 압력 제어실로부터 유출된 연료에 의해 홀로우 챔버에 압력이 형성된다. 홀로우 챔버에 연속 방정식을 적용하면, 식 (6)과 같은 홀로우 챔버 압력에 대한 미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{P}_h = \frac{\beta_{fh}}{V_h} (\dot{Q}_{hi} - \dot{Q}_{ho} + \dot{V}_h) = \frac{\beta_{fh}}{V_h} (\dot{Q}_{hi} - \dot{Q}_{ho}) \quad (6)$$

### 3.1.5 서보 피스톤과 니들 밸브

서보 피스톤과 니들밸브는 압력 제어실과 축압실의 압력차에 의해 연료분사를 수행하는 역할을 한다. 스프링력과 압력차에 의한 힘이 주로 작용되어 식 (7)과 같이 표현된다.

$$(m_p + m_n) \ddot{x}_n = -k_n(x_{nf} - x_{n0}) - k_n x_n - A_p P_c + P_{rail}(A_n - A_{ns}) - (m_p + m_n)g \cos \theta \quad (7)$$

### 3.1.6 Sac 챔버

Sac 챔버의 압력은 서보피스톤과 니들 밸브의 변위에 따라 변화하며, Sac 챔버와 실린더와의 압력차로 인하여 연료분사를 수행한다. Fig. 4와 같은 Sac 챔버의 연속방정식을 적용하면 식 (8)과 같은 미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{P}_s = \frac{\beta_{fs}}{V_s} \cdot (\dot{Q}_{si} - \dot{Q}_{so} + \dot{V}_s) \quad (8)$$

## 3.2 인젝터 모델 검증

인젝터 동적 모델을 검증하기 위하여, 인젝터 구동기간 및 레일 압력에 따른 구동 전류와 분사율을 측정하는 기초 실험을 수행하였으며, 실험 결과와 인젝터 모델을 통한 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 인젝터 모델의 입력은 솔레노이드 구동 전압이며, 출력은 구동전류이다. 모델의 신뢰도를 검증하기 위하여 다양한 조건에서 시뮬레이션 결과와 측정치를 비교하였으며, Fig. 6과 Fig. 7은 여러 조건 중 레일 압력 1100bar와 1200bar, 구동 기간 1.0ms와 1.5ms에서의 실험과 시뮬레이션을 통한 비교 결과를 나타낸다. 분사율의 경우 시뮬레이션 결과와 실험 결과 사이에 약간의 오차가 발생하고 있으나 분사율의 전반적인 특성을 잘 반영하고 있다. 측정된 분사율에는 실제 연료 분사시에 발생하는 공급압력의 변동에 의한 압력제어실 및 축압실의 맥동현상의 영향이 나타나고 있으며, 모델에서는 공급압력의 맥동현상을 무시하였으므로 축압실의 압력변동에 의한 고주파 성분은 나타나지 않고 있다.

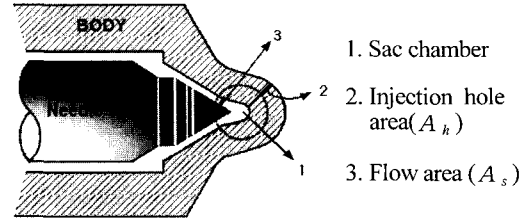


Fig. 4 Nozzle configuration

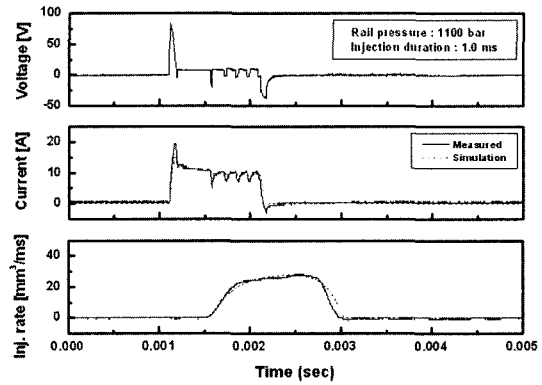


Fig. 5 Comparison between the simulation and the experiment (I)

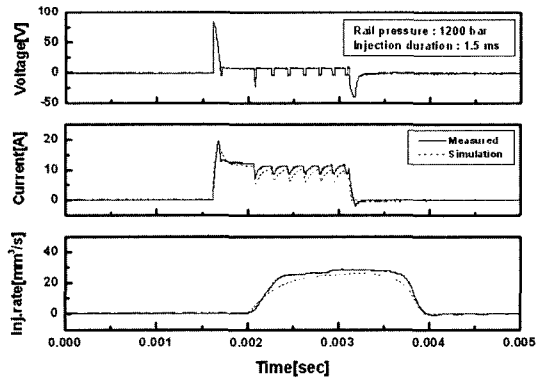


Fig. 6 Comparison between the simulation and the experiment (II)

## 4. 관측기 설계

### 4.1 상태변수 관측기

대부분의 현대 제어이론들은 상태변수에 관한 정

보를 필요로 하며, 이를 위해서는 각 상태변수와 관련된 물리량을 직·간접적으로 측정할 수 있는 센서들이 필요하다. 그러나 이러한 물리량의 측정에 사용되는 센서들은 고가이거나 또는 양산 제품에의 적용에 부적합한 경우가 많으며, 때로는 적용 가능한 센서가 없는 경우도 있으므로 모든 상태변수를 측정하는 것은 비합리적이다. 따라서 상태변수를 측정하기 위한 새로운 방법이 필요하며 그 대안으로 제시된 것이 관측기이다. 관측기란 제어 시스템의 출력을 이용하여 상태변수를 추정하는 수학적인 알고리즘으로, 센서리스 제어에 많이 이용되고 있다.

#### 4.2 분사율 관측기 설계

선형 시스템에 적용 가능한 Luenberger 관측기를 기반으로 하여, 인젝터의 분사과정과 같은 비선형 시스템의 상태변수 추정을 위한 많은 연구가 있어 왔으며,<sup>7)</sup> 그 중 모델링 오차를 고려할 수 있는 슬라이딩 관측기<sup>8,9)</sup>가 비선형 시스템의 상태변수 추정에 많이 이용되고 있다. 연료분사 동역학과 같은 단일 입·출력 비선형 시스템에 대한 슬라이딩 관측기는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= f_1(\hat{x}, u) + k_1 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_2 &= f_2(\hat{x}, u) + k_2 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ &\vdots \\ \hat{x}_8 &= f_8(\hat{x}, u) + k_8 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (9)$$

상태변수 추정오차를 식 (10)과 같이 정의하면,

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (10)$$

분사율 관측기의 오차동역학은 식 (11)와 같이 표현된

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \Delta f_1 - k_1 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \tilde{x}_2 &= \Delta f_2 - k_2 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ &\vdots \\ \tilde{x}_8 &= \Delta f_8 - k_8 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta f_i = f_i(x, u) - f_i(\hat{x}, u) \quad (12)$$

슬라이딩 함수를 식 (13)의 형태로 정의하면,

$$s = \tilde{x}_1 \quad (13)$$

$\tilde{x}_1$ 에 대한 슬라이딩 조건은 식 (14)와 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad \text{or} \quad \dot{s} = -\eta \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

$|\Delta f_i| \leq F_i$ 라 가정하면,  $\hat{x}_1$ 이 슬라이딩면에 도달하기 위해서는  $k_i$ 를 식 (15)와 같이 선택할 수 있다.

$$k_i \geq \eta_i + F_i \quad (15)$$

식 (15)에 의해  $\tilde{x}_1$ 은 추정오차가 0으로 수렴되는 슬라이딩면에 도달된다.

$$s(t) = 0 \quad (16)$$

따라서, 측정된 시스템의 출력으로부터 상태변수  $x(t)$ 를 추정하는 것이 가능하다.

### 5. 실험 장치

Fig. 7은 인젝터 성능 시험기(Injector test bench), 자료 획득 장치 및 일본의 ONO SOKKI에서 제작된 분사율 측정기(injection rate meter)의 사진이다. 실제 커먼 레일 분사계와 동일한 조건을 재현하도록 설계되었으며, 기관에 동기화 시키지 않고 커먼 레일 분사 시스템의 성능 구현을 목적으로 레일 압력을 1350bar까지 조절할 수 있도록 제작된 시험 장치이다. 이 연구에서는 다양한 운전 조건을 고려하여 레일 압력(700~1300bar)과 인젝터 구동 기간(0.5~1.5ms)을 변화시켜 전압, 전류 및 분사율을 측정한다.



Fig. 7 Injector test bench

### 6. 실험 결과

분사율 추정기의 성능 확인 실험은 인젝터 모델 검증에 위한 기초실험과 같은 조건에서 실시되었으며, 다양한 운전조건을 재현하기 위하여 레일 압력과 인젝터 구동기간을 변화시키면서 실험하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 1200bar로 고정된 레일 압력 하에서 인젝터 구동 기간을 0.5ms와 1.0ms로 변화시킨 경우의 결과 그래프이며, Fig. 10과 Fig. 11은 인젝터 구동기간을 1.0ms로 고정한 상태에서 레일 압력을 1100bar와 1300bar로 변화시킨 경우의 측정값과 추정값 사이의 비교 결과를 나타낸다.

Fig. 12와 Fig. 13은 파일럿 분사<sup>10)</sup>가 포함된 경우의 분사율 추정 결과를 보여주고 있으며, 파일럿 분사시 공급 압력의 맥동 증가로 다소 오차가 커지지만, 이 경우에도 전류와 분사율이 효과적으로 추정되고 있음을 알 수 있다.

### 7. 결론

이 연구는 커먼 레일 연료분사시스템에서 연료분사량 및 분사시기의 되먹임제어를 위한 기초연구로

서, 인젝터의 동적 모델을 소개하였고, 슬라이딩 관측기를 이용하여 분사량과 분사시기를 추정하는 알고리즘을 제시하였으며, 실험과 시뮬레이션을 통하여 인젝터의 동적 모델 및 분사율 추정기의 신뢰도

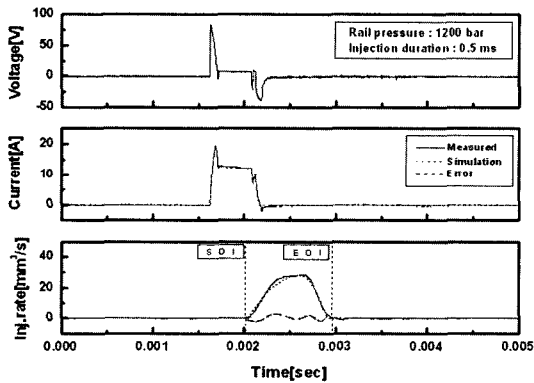


Fig. 8 Estimation of injection timing and rate for various injection durations (I)

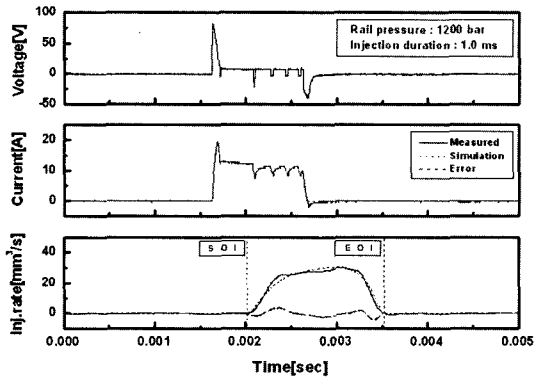


Fig. 9 Estimation of injection timing and rate for various injection durations (II)

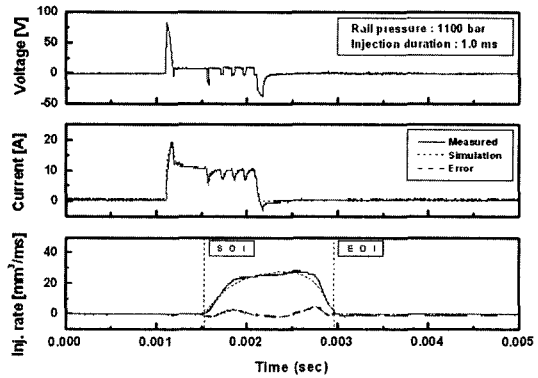


Fig. 10 Estimation of injection timing and rate for various injection pressures (I)

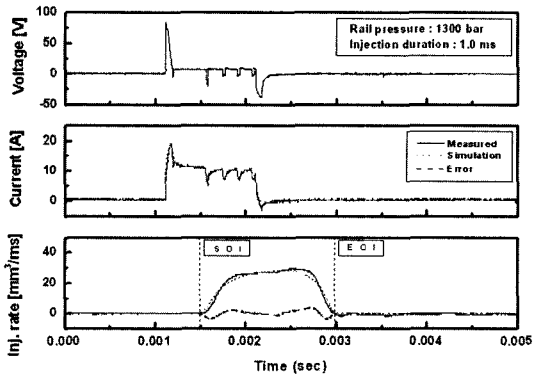


Fig. 11 Estimation of injection timing and rate for various injection pressures (II)

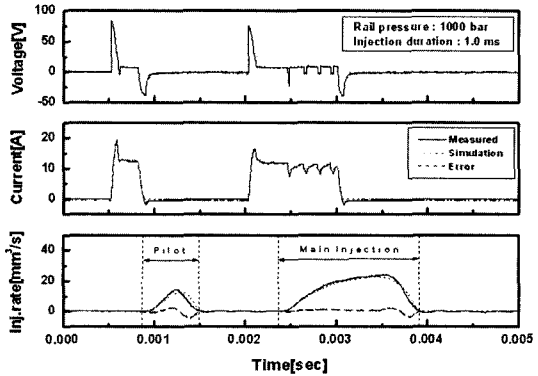


Fig. 12 Estimation of injection timing and rate for various pilot injection (I)

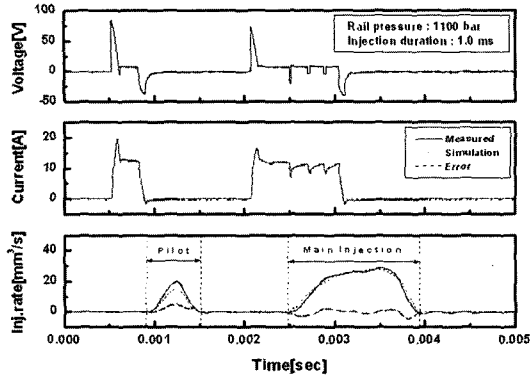


Fig. 13 Estimation of Injection timing and rate for various pilot injection (II)

를 검증하였다.

이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 인젝터 모델은 솔레노이드의 흡인력 및 인젝터의 동특성을 반영하였으며, 모델링 오차에 강인성을 갖는 슬라이딩 관측기를 적용하기에 적합하도록 구성되었다.
- 2) 단일 입·출력을 갖는 8차 비선형 미분방정식으로 표현되는 인젝터의 수학적 모델을 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.
- 3) 인젝터의 동적 모델을 기반으로 분사율을 추정하는 관측기의 알고리즘을 제시하였다.
- 4) 비선형 슬라이딩 관측기(Sliding observer)를 적용하여 모델링 오차에 대해서도 강인한 분사율 추정기를 설계하였다.
- 5) SOI와 EOI 추정을 통해서 분사 시작과 종료시점을 검출할 수 있었다.
- 6) 시뮬레이션과 실험을 통하여 분사율 추정 알고리즘을 검증함으로써 연료분사량 및 분사시기의 센서리스 피드백 제어에 대한 가능성을 입증하였다.

### References

- 1) W. Bohner, K. Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles," SAE 970345, 1997.

- 2) G. Stumpp, M. Ricco, "Common Rail - An Attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," SAE 960870, 1996.
- 3) D. T. Hountalas, A. D. Kouremenos, "Development of a Fast and Simple Simulation Model for the Fuel Injection System of Diesel Engines," Advances in Engineering Software, Vol.29, No.1, 1998.
- 4) H. Kano, M. Kato, "Contribution of Optimum Design for Nozzle Configuration to Spary Formation," SAE 900824, 1990.
- 5) M. H. Sunwoo, P. J. Yoon, S. B. Park, J. M. Jin, "A Study on the Electronic Control of HSDI Diesel Engines," Proceeding of 7th Next Generation Vehicle Workshop, 1999.
- 6) H. Y. Kim, J. y. Koo, H. K. Na, C. S. Kim, "Simulation of High Pressure Common-rail Fuel Injection System," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.162-173, 1998.
- 7) E. A. Misawa, J. K. Hedrick, "Nonlinear Observers-A State-of-the-Art Survey, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.111, Sept., 1989.
- 8) G. B. Wang, S. S. Peng, H. P. Huang, "A Sliding Observer for Nonlinear Process Control," Chemical Engineering Science, Vol.52, No.5, pp.787-805, 1997.
- 9) J. E. Slotine, J. K. Hedrick, E. A. Misawa, "On Sliding Observer for Nonlinear Systems," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.109, Sept., 1987.
- 10) N. A. Henein, M-C. Lai, "Characteristics of A Common Rail Diesel Injection System Under Pilot and Post Injection Modes," SAE 2002-01-0218, 2002.