

## 피에조 인젝터의 모델링 및 분사율의 추정

김 선 우 · 정 남 훈 · 선 우 명 호\*

한양대학교 자동차공학과

## Modeling and Injection Rate Estimation of a Piezo Injector for CRDI Diesel Engines

Sunwoo Kim · Namhoon Chung · Myoungho Sunwoo\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(Received 6 September 2004 / Accepted 25 November 2004)

**Abstract** : Stringent emission regulations and increasing demands on reductions of noise and vibration of common rail direct injection (CRDI) diesel engines lead to the advent of piezo-actuated injectors. Compared with solenoid-actuated injectors, piezo-actuated injectors generate greater force and give faster response time, resulting in more accurate and faster injections. The accurate and fast response of an injector can offer an opportunity to control the combustion process and pollutant formation. In this study, the mathematical model of a piezo-actuated injector is developed. An estimator of the injection rate of the piezo-actuated injector is designed based on this model. The sliding mode theory is applied to the estimator design in order to overcome model uncertainties. The injector model and the estimator are verified by the 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 timing and the injection rate of the piezo-actuated injector.

**Key words** : CRDI(커먼 레일 직분식), Piezo injector(피에조 인젝터), Injection rate(분사율), Sliding mode observer(슬라이딩 관측기)

### Nomenclature

$A$	: area, $m^2$	$P$	: pressure, $Pa$
$b$	: viscous friction coefficient	$Q$	: volumetric flow rate, $m^3/s$
$C_d$	: discharge coefficient	$S_3$	: strain
$D_3$	: electric displacement, $C/m^2$	$T_3$	: stress, $Pa$
$E_3$	: electric field, $V/m$	$V$	: volume, $m^3$
$F$	: force, $N$	$v$	: voltage, $V$
$m$	: mass, $kg$	$x$	: displacement, $m$ or state variable
		$\beta$	: bulk modulus of fuel, $N/m^2$
		$\rho$	: density of fuel, $kg/m^3$

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

**Subscripts**

- c* : control chamber
- n, ns* : needle, needle seat respectively
- pv* : poppet valve
- pz* : piezo
- s* : spring
- sac* : sac chamber
- v* : valve piston or valve chamber

**1. 서론**

디젤 엔진은 높은 열효율과 낮은 CO<sub>2</sub> 배출량 등의 장점에도 불구하고, PM(particulate matter), NO<sub>x</sub>와 같은 유해한 배기배출물 및 아이들(idle) 운전시 소음과 진동의 문제점이 그 성장에 걸림돌이 되고 있다. 또한 디젤차량에서 발생한 유해 배기가스가 사회적 문제점으로 대두되면서 세계 각국에서는 디젤차량의 배기규제를 강화하고 있다.<sup>1)</sup> 커먼레일(common rail) 기술은 디젤엔진의 유해한 배기가스의 배출량과 소음 및 진동을 저감시킬 수 있는 해결 방안으로 주목받고 있다. 커먼레일 방식은 레일(rail)이라고 불리는 연료축압기(fuel accumulator)에 고압으로 저장된 연료를 각각의 인젝터로 배분하여 분사시키는 방식이다. 디젤엔진의 전자제어시스템(ECU)은 레일압력(rail pressure), 연료분사시기(injection timing), 분사량(injection quantity) 및 분사율(injection rate) 등을 제어한다.<sup>2,3)</sup>

최근에는 커먼레일 분사시스템에 사용되고 있는 인젝터의 구동방식이 솔레노이드(solenoid) 구동식에서 피에조(piezo) 구동식으로 바뀌어가고 있는 추세이다. 피에조 구동방식의 인젝터는 솔레노이드 구동방식의 인젝터 보다 훨씬 빠른 응답성능을 나타내며, 더 큰 구동력을 발생시킬 수 있다. 이러한 피에조 구동방식의 특성으로 인하여 피에조 인젝터(piezo-actuated injector)는 솔레노이드 인젝터(solenoid-actuated injector)에 비하여 높은 연료 압력에서 정밀한 분사량 제어가 가능하다.

이 연구에 앞서 솔레노이드 인젝터의 수학적 모델을 수립하고, 솔레노이드 인젝터의 연료분사시기와 분사율에 대하여 센서를 사용하지 않고 추정하

는 연구가 수행된 바 있다.<sup>1)</sup> 이 연구는 피에조 인젝터에 대한 수학적 모델을 정립하고, 관측기를 이용하여 피에조 인젝터의 분사시기 및 분사량의 추정을 통한 분사량 및 분사시기의 되먹임제어(feedback control)를 위한 기초 연구이다. 또한 피에조 인젝터의 성능실험을 통하여 관측기의 성능을 검증한다.

**2. 피에조 인젝터의 작동원리**

이 연구에 사용한 피에조 인젝터는 2-웨이 밸브(2-way valve) 방식이며, Fig. 1은 작동원리를 도시한 그림이다. 피에조 구동기는 100~300 개의 얇은 세라믹 소재(ceramic element)들이 적층되어 하나의 피에조 스택(piezo stack)을 구성하며, 세라믹 판 사이에는 양극과 음극의 금속전극이 연결되어 전기적으로는 병렬회로로 구성된다. 피에조 스택에 전압이 가해지면 각각의 세라믹 소재는 팽창하거나 수축하게 되어 힘을 발생시킨다.<sup>4)</sup>

역압전효과(converse piezoelectric effect)를 이용한 피에조 인젝터의 작동 과정은 다음과 같다. 전자 제어유닛에서 발생한 전압이 피에조 구동기에 가해지면 피에조 스택(piezo stack)의 상하방향 길이가 증가하여 포핏 밸브(poppet valve)가 열리는 방향으로 이동한다. 이때 압력 제어실(control chamber)의

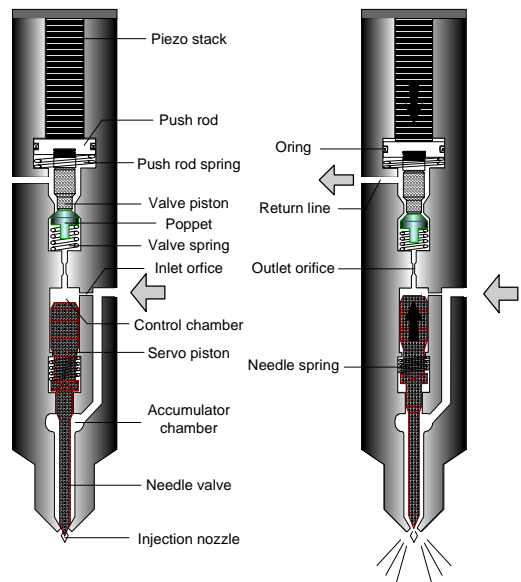


Fig. 1 Operation principle of a piezo injector

압력이 감소되어 축압실(accumulator chamber)과 압력제어실의 압력차에 의하여 니들밸브가 열리면서 분사가 시작된다.

### 3. 피에조 인젝터 모델링

인젝터의 동적 모델은 피에조 구동기 모델(piezo-actuator model), 기계요소 모델(mechanical model) 및 유압 모델(hydraulic model)의 세 부분으로 구성된다. 인젝터 모델의 입력은 피에조 구동기에 인가되는 전압과 전압의 시간에 대한 변화율로 하며, 출력은 피에조 스택에 발생하는 전하량으로 한다.

연료 분사과정의 동역학은 매우 복잡하나 인젝터 자체에만 한정하여 다음의 가정 하에 인젝터 모델을 유도한다.<sup>1,7)</sup>

- 피에조 구동기는 선형특성을 나타낸다.
- 연료 공급압력의 맥동현상은 무시한다.
- 축압실의 압력은 공급압력과 같다.
- 연료 복귀압력은 대기압과 같다.
- 가동부의 마찰은 무시한다.
- 연료분사시 연소실 내의 압력은 일정하다.

#### 3.1 인젝터 모델 구성

##### 3.1.1 피에조 구동기 모델

인가된 전압에 대한 피에조 스택의 거동특성은 선형 및 비선형 모델로 나타낼 수 있으며, 정밀한 위치 제어가 요구되는 시스템에서는 피에조 소자의 비선형 거동특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나<sup>5)</sup> 이 연구에서는 전압인가 시 피에조 스택에서 발생하는 힘의 크기가 중요한 요소이므로 피에조 소자의 거동을 선형으로 고려한다.

피에조 소자의 선형특성식은 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.<sup>6)</sup>

$$T_3 = c_{33}S_3 - e_{33}E_3 \quad (1)$$

$$D_3 = e_{33}S_3 + \epsilon_{33}E_3 \quad (2)$$

여기서,  $c_{33}$ 는 피에조 소자의 탄성계수,  $e_{33}$ 는 피에조 상수,  $\epsilon_{33}$ 는 피에조 소자의 유전율이다.

Fig. 2는 100개 이상의 피에조 소자가 적층되어 전기적으로 병렬회로를 이루는 피에조 스택의 간략

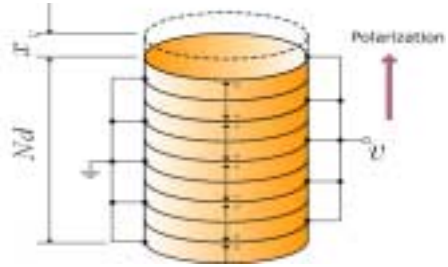


Fig. 2 Schematic of a piezo stack

도이다. 각 피에조 소자에 전압  $v$ 가 인가되면 피에조의 역압전효과에 의하여 피에조 소자는 원래 길이  $L_0$ 에서  $x_v$ 만큼 인장된다. 두께  $d$  단면적  $A_{pz}$ 의 피에조 소자  $N$ 층으로 구성된 피에조 스택이 축방향으로 가하는 힘은 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>4)</sup>

$$F_{pz} = \frac{A_{pz}e_{33}}{d} v - \frac{A_{pz}c_{33}}{Nd} x_v \quad (3)$$

식 (2)에서 전기변위  $D_3$ 는 전하량  $q$ 를 피에조 소자의 단면적  $A_{pz}$ 로 나눈 양이다. 변형을  $S_3$ 는 늘어난 길이의 비율이며, 전기장  $E_3$ 는 인가된 전압  $v$ 를 피에조 스택의 길이로 나눈 양이므로 이것들을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 피에조 스택에 충전되는 전하량  $q$ 를 유도할 수 있다.

$$q = \frac{A_{pz}e_{33}}{d} x_v + \frac{A_{pz}N\epsilon_{33}}{d} v \quad (4)$$

##### 3.1.2 기계요소 모델

밸브 피스톤과 니들 밸브와 같은 기계요소는 Newton 제2법칙을 따르는 동적 모델로 표현된다. 밸브 피스톤은 피에조 스택에 의하여 발생된 힘을 전달받아 포핏밸브를 개폐하여 밸브 챔버의 압력을 조절하는 역할을 한다. 밸브 피스톤의 거동은 피에조 스택의 구동력, 스프링력 및 압력차에 의하여 결정된다. 밸브 피스톤의 거동에 대한 지배방정식은 식 (5)와 같다.

$$\left(m_v + \frac{m_{pz}}{3}\right) \ddot{x}_v = F_{pz} - F_{s_c} - b_v \dot{x}_v - A_{pp} P_v \quad (5)$$

니들 밸브의 거동은 압력제어실과 축압실의 압력차에 의하여 결정되며, 스프링력과 압력차에 의한 힘이 작용되어 식 (6)과 같이 표현된다.

$$(m_n + m_p)\dot{x}_n = -F_{s_n} - b_n \dot{x}_n - A_p P_c + (A_n - A_{ns})P_{rail} \quad (6)$$

단,  $A_n$  : cross-sectional area of needle valve

$A_{ns}$  : cross-sectional area of needle seat

### 3.1.3 유압 모델

질량보존법칙에 의하여 검사체적(control volume)의 압력은 유입되는 유량과 유출되는 유량 그리고 체적에 의존한다. 연속방정식을 압력제어실, 밸브 챔버, Sac 챔버에 적용하면 식 (7)과 같이 각 검사체적내의 압력에 대한 미분방정식으로 표현된다.<sup>10)</sup>

$$\dot{P} = \frac{\beta}{V} (Q_i - Q_o - \dot{V}) \quad (7)$$

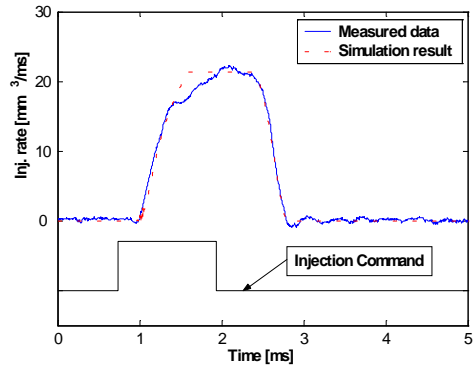
단,  $\beta = 12000(1 + 0.6 \frac{P}{600})$

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

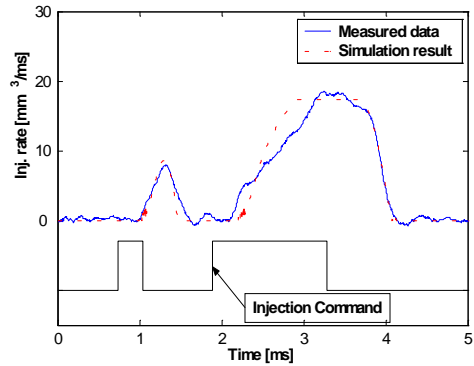
### 3.2 인젝터 모델 검증

피에조 인젝터의 동적 모델을 검증하기 위하여 레일압력 및 분사시간의 변화에 따른 인젝터 구동 전류와 연료 분사율을 측정하는 기초 실험을 수행하였다. Fig. 3(a)는 레일압력 600 bar, 구동기간 1.2 ms 일 때 분사율의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 측정값과 모델로부터 구한 시뮬레이션 값을 비교하여 보면 분사시점, 분사종료점 및 분사 초기와 분사말기의 분사율의 기울기가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 분사초기에 분사율 최고값의 75% 인 시점부터 분사율 측정값이 시뮬레이션 값보다 작은 값을 보이고 있다. 이는 분사초기에 연료분사로 인한 레일의 압력강화에 기인한 것으로 판단된다. 분사초기에 발생하는 레일의 압력강화는 0.8 ms 후 고압 연료펌프에 의하여 시험시 설정된 분사압력인 600 bar로 즉시 회복되어 측정값과 시뮬레이션값 사이의 오차가 작아지게 된다.

Fig. 3(b)는 레일압력 400 bar, 구동기간 0.3 ms의 파일럿분사(pilot injection)와 구동기간 1.4 ms의 주분사(main injection)로 이루어진 분사조건일 때의 실험과 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에 나타



(a) Rail pressure : 600 bar, injection duration : 1.2 ms



(b) Rail pressure : 400 bar, pilot injection duration : 0.3 ms, main injection duration : 1.4 ms

Fig. 3 Comparison between the measured and modeled injection rate

난 바와 같이 파일럿 분사초기와 주분사 말기의 분사율 기울기가 잘 일치하고 있으나, 파일럿분사로 인하여 레일의 압력강화가 발생하여 주분사 초기의 분사율이 작게 측정된다. 또한 주분사의 분사시점이 시뮬레이션 결과보다 약 0.1 ms 앞서는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 시뮬레이션시 공급압력 변동에 의한 압력제어실 및 축압실의 압력맥동현상을 무시하였으나 실제로는 연료 분사시에 압력맥동현상의 영향이 분사시점의 오차를 발생시킨 것으로 판단된다. 분사명령 전, 니들밸브가 완전히 닫힌 기간에 나타나는 분사율 측정값의 떨림현상은 분사율 측정기(injection rate meter)의 측정오차에 기인하는 것으로 추정된다. Fig. 3 (a)와 (b)에서 분사된 연료분사량의 오차는 3% 이내이다.

주분사만 있는 경우와 파일럿과 주분사가 있는 경우 모두 분사율 측정값과 모델을 통한 시뮬레이션 결과 사이에 오차가 발생하나, 제시된 인젝터 모델은 각 경우에 있어 분사율의 전반적인 특성을 잘 반영하고 있다.

#### 4. 관측기 설계

##### 4.1 상태변수 관측기

대부분의 현대 제어이론들은 상태변수(state variable)에 관한 정보를 필요로 하며, 이를 위하여는 각 상태변수와 관련된 물리량을 직·간접적으로 측정할 수 있는 센서가 필요하다. 그러나 이러한 물리량의 측정에 사용되는 센서는 고가이거나 양산 제품에의 적용에 부적합한 경우가 많으며, 때로는 적용 가능한 센서가 없는 경우도 있으므로 모든 상태변수를 측정하는 것은 비합리적이다. 따라서 센서를 사용하지 않고 상태변수에 대한 정보를 얻기 위하여 제시된 것이 관측기(observer)이다. 관측기는 제어시스템의 출력을 이용하여 상태변수를 추정하는 수학적인 알고리즘이며, 센서리스 제어에 많이 이용되고 있다. 이 연구에서는 피에조 인젝터의 연료 분사율을 센서를 사용하지 않고 추정하기 위해서 상태변수 관측기를 제안하고 실험을 통하여 검증하였다.

##### 4.2 분사율 관측기 설계

관측기는 시스템의 선형성 및 비선형성에 의하여 설계방법이 다르며 인젝터의 분사과정은 오리피스를 통과하는 연료의 유동방정식을 포함하고 있어 비선형특성을 나타낸다. 선형시스템에 적용이 가능한 루엔버거(Luenberger) 관측기를 기반으로 하여 인젝터와 같은 비선형 시스템의 상태변수 추정을 위한 많은 연구가 있으며<sup>8)</sup> 그 중에서도 시스템의 모델링 오차를 고려할 수 있는 슬라이딩 관측기<sup>9)</sup>가 비선형 시스템의 상태변수 추정에 많이 이용되고 있다. 이 연구에서는 피에조 인젝터를 8개의 상태변수, 2개의 입력 및 1개의 출력을 갖는 비선형시스템으로 고려하였다. 식 (8)과 같이 인젝터의 상태방정식을 표현했을 때, 분사율을 추정하기 위한 슬라이딩 관측기는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \mathbf{x} &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8] \\ &= [q, x_v, \dot{x}_v, P_v, P_c, x_n, \dot{x}_n, P_s] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + k_1 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + k_2 \operatorname{sgn}(x_2 - \hat{x}_2) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{x}}_8 &= f_8(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + k_8 \operatorname{sgn}(x_8 - \hat{x}_8) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 ^기호는 상태변수의 관측된 값을 나타낸다. 상태변수의 추정오차를 식 (10)과 같이 정의하면 상태변수 관측기의 오차동역학은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \tag{10}$$

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

$$\text{단, } \Delta f_i = f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - f_i(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u})$$

슬라이딩 함수  $s$ 를 식 (12)의 형태로 정의하면 임의의 값  $\eta_i$ 에 대하여 식 (13)과 같은 슬라이딩 조건을 갖는다.

$$s = \tilde{x}_i \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} s^2 \right) &= \dot{s} s \\ &= \tilde{x}_i (\Delta f_i - k_i \operatorname{sgn}(\tilde{x}_i)) < -\eta_i |s| \end{aligned} \tag{13}$$

슬라이딩 조건을 만족시키기 위하여 슬라이딩 게인  $k_i$ 는 식 (14)와 같이 선택할 수 있다.

$$k_i > \eta_i + |\Delta f_i| \tag{14}$$

식 (14)에 의하여 상태변수의 추정 오차  $\tilde{x}_i$ 은 0으로 수렴되는 슬라이딩면에 도달된다. 따라서 측정된 시스템의 출력으로부터 상태변수  $\mathbf{x}(t)$ 를 추정

하는 것이 가능하게 된다.

### 5. 실험 장치

Fig. 4는 인젝터 성능시험기(injector test bench)의 간략도이다. 이 시험기는 커먼레일 분사시스템과 동일한 분사조건을 재현할 수 있도록 설계되었다. 커먼레일 압력이 100~1400 bar 범위 내의 일정한 값으로 유지된 상태에서 펄스발생기(pulse generator)가 분사신호를 보내면 인젝터 드라이버(injector driver)가 공급전류를 발생시켜 피에조 인젝터를 구동시킨다. 분사실험시 피에조 구동기에 인가된 전압 및 전류와 분사율은 측정기에 의하여 측정되어 기록된다. 분사율 측정에는 ONO SOKKI사에서 제작한 FJ400 모델의 분사율 측정기를 사용하였고 PIEZOMECHANIK사에서 제작한 인젝터 드라이버를 사용하였다. 펄스발생기는 자체 제작하였다.

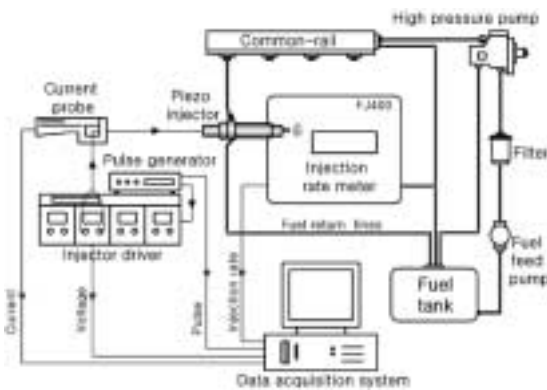


Fig. 4 Experimental setup of injector test bench

### 6. 실험 결과

분사율 관측기의 성능 검증실험은 인젝터 모델 검증을 위한 기초실험과 유사한 분사조건에서 실시하였으며, 주분사만 있는 경우와 파일럿 분사가 포함된 경우에 대하여 레일압력을 변화시키면서 실험하였다. Fig. 5는 각각의 시험조건에 대하여 피에조 인젝터 시스템의 입력인 피에조 인가전압, 피에조 스택에 축적된 전하량과 연료 분사율의 측정값과 추정값을 비교한 그래프이다. Fig. 5(a), (b), (c) 및 (d)는 구동기간 1.2 ms의 주분사만 있는 경우이며, 레일압력은 각각 400, 600, 800, 1200 bar이다. Fig. 5(e)

와 (f)는 구동기간 1.4 ms의 주분사에 구동기간 0.3 ms의 파일럿분사가 포함된 경우이며 레일압력은 각각 400, 600 bar 일 때의 실험 결과이다.

Fig. 5(a), (b) 및 (c)에서 전하량 추정 곡선의 경우, 상승구간에서 최고치를 10% 정도 넘어서는 오버슈트(overshoot)가 발생한다. 특히 Fig. 5(b)의 레일 압력 600 bar 조건의 추정값에서는 분사 후 피에조 스택에 전하가 남아있지 않아야 할 기간에 음의 전하량을 축적하는 것으로 나타내고 있다. 이는 전하량 상승시 발생한 오버슈트의 반대 현상으로 분사율 추정 곡선에는 영향을 주지 않는다. 레일 압력 1200 bar 조건인 Fig. 5(d)의 분사율 그래프에서는 분사말기에 측정된 분사율과 추정된 분사율 사이에 오차가 발생하고 있다. 이러한 현상은 높은 레일압력에 의한 인젝터 내부의 연료 누유(internal leakage)와 출구오리피스 양단의 높은 압력차에 기인한 공동현상(cavitation)발생으로 유량계수의 오차에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 5(e)와 (f)의 파일럿 분사가 포함된 경우는 앞서 모델검증 시 언급한 바와 같이 파일럿 분사 후 주분사 초기의 분사율 상승구간에서 오차가 관찰된다. 그러나 분사된 연료분사량의 오차는 3% 이내로 분사율 관측기는 상태변수의 급격한 변화를 적절히 추종하고 있음을 알 수 있다.

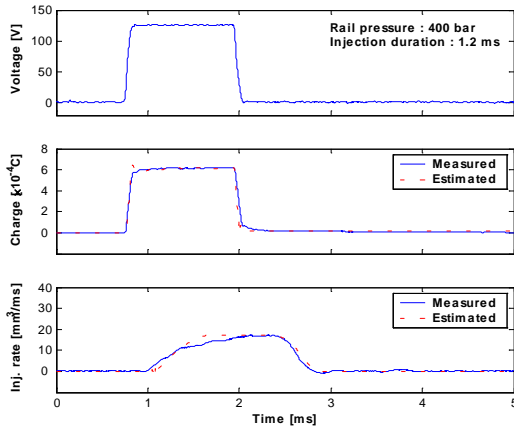
결론적으로 다양한 조건하에서 실시한 실험을 통하여 제시된 분사율 관측기는 작동범위 내의 레일 압력과 적용 가능한 분사형태에 대하여 적절한 성능을 내는 것으로 판단된다.

### 7. 결론

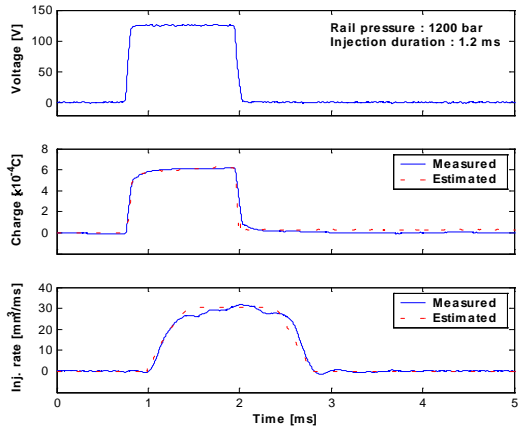
이 연구는 피에조 인젝터를 장착한 커먼레일 연료분사 시스템에 대하여 분사시기와 분사율의 되먹임제어(feedback control)를 위한 기초 연구로서 피에조 인젝터의 동적 모델을 제시하였으며, 슬라이딩 관측기를 이용하여 분사량과 분사시기를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 개발된 피에조 인젝터의 동적 모델과 관측기는 인젝터 실험을 통하여 검증되었다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 피에조 인젝터의 수학적 모델은 피에조 구동기의 역압전효과 및 인젝터의 동특성이 반영되도

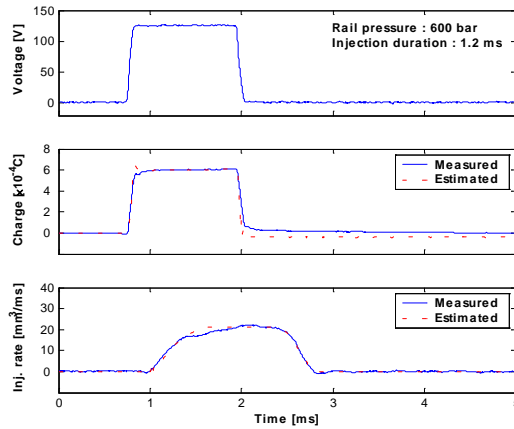
피에조 인젝터의 모델링 및 분사율의 추정



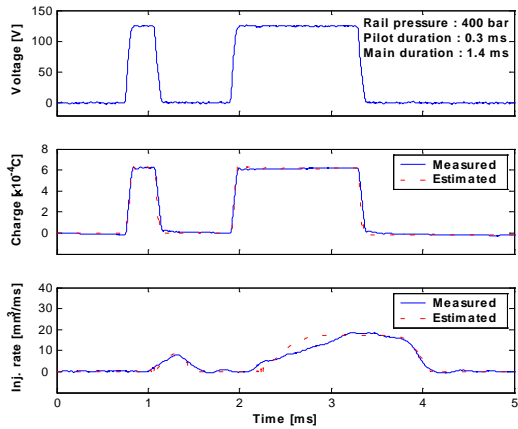
(a) Rail pressure of 400 bar, injection duration of 1.2 ms



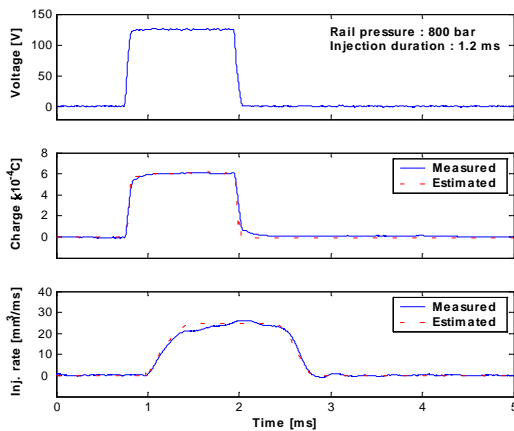
(d) Rail pressure of 1200 bar, injection duration of 1.2 ms



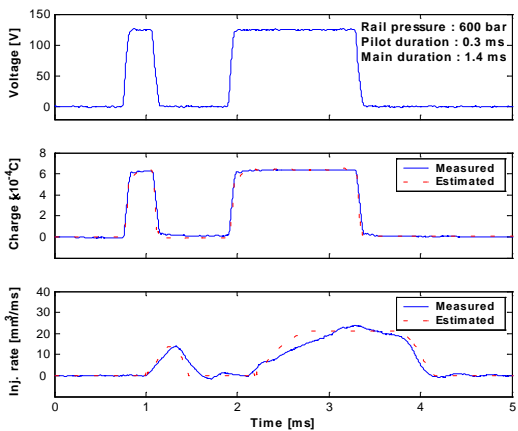
(b) Rail pressure of 600 bar, injection duration of 1.2 ms



(e) Rail pressure of 400 bar, pilot injection duration of 0.3 ms, main injection duration of 1.4 ms



(c) Rail pressure of 800 bar, injection duration of 1.2 ms



(f) Rail pressure of 600 bar, pilot injection duration of 0.3 ms, main injection duration of 1.4 ms

Fig. 5 Comparison between the measured and estimated electric charge and injection rate

록 구성하였다.

- 2) 인젝터의 수학적 모델은 8차의 비선형 미분방정식으로 제시하였다. 실험을 통하여 파일럿분사가 없는 경우에는 분사시기의 오차가 30  $\mu$ s 미만, 분사율의 오차가 최대값 기준 15 % 미만, 분사량의 오차가 3 % 미만의 모델임을 검증하였다.
- 3) 인젝터 모델을 기반으로 분사율을 추정하는 슬라이딩 관측기의 알고리즘을 제시하였다.
- 4) 제안된 분사율 관측기는 400~1200 bar 의 레일압력 범위에서 여러 분사조건에 대하여 적절한 관측성능을 나타내었다.
- 5) 관측기 성능검증을 통하여 디젤 엔진용 피에조인젝터의 연료분사량 및 분사 시기의 되먹임 제어 가능성을 입증하였다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업(M1-0412-00-0058) 및 미래형자동차 배기가스 제어 화기술 개발 사업(M1042601006-04L2601-00615)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) K. Nam, S. Park and M. Sunwoo, "Dynamic Model of an HSDI Common-rail Injector and Injection Rate Estimation," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.43-49, 2003.
- 2) G. Stumpp and M. Ricco, "Common Rail - An Attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," SAE 960870, 1996.
- 3) W. Boehner and K. Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles," SAE 970345, 1997.
- 4) N. Jalili, J. Wagner and M. Dadfarnia, "A Piezoelectric Driven Ratchet Actuator Mechanism with Application to Automotive Engine Valves," Mechatronics, Vol.13, pp.933-956, 2003.
- 5) H. Adriaens, W. L. de Koning and R. Banning, "Modeling Piezoelectric Actuators," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No.4, pp.331-341, Dec, 2000.
- 6) An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Standard 176-1987, 1987.
- 7) D. Baranowski, W. Klugl and D. Schoppe, "Simulation and Design Optimization of a Common Rail Piezo Injector for Passenger Car DI Diesel Engines," Fuel Injection Systems, pp.219-232, 1999.
- 8) E. A. Misawa and J. Hedrick, "Nonlinear Observers - A State-of-the-Art Survey," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.111, Sep., 1989.
- 9) J. E. Slotine, J. K. Hedrick and E. A. Misawa, "On Sliding Observer for Nonlinear Systems," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.109, Sep., 1987.
- 10) V. L. Streeter and E. B. Wylie, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, 1979.