

직분식 커먼레일 디젤엔진의 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 연료분사를 추정

사중성*, 정남훈**, 선우명호#

A Study on the Injection Rate Observer of the Piezo-actuated and Solenoid-operated Injectors for CRDI Diesel Engines

Jongseong Sa*, Namhoon Chung** and Myoungho Sunwoo#

ABSTRACT

Fuel injection system greatly affects the performance of a direct injection diesel engine. A common rail injection system was introduced to satisfy the stringent emission standards, low fuel consumption, and low noise in recent years. The performance of a common-rail fuel injection system is strongly influenced by the injector characteristics. The common rail injector has evolved in order to improve its injection performance. The piezo-actuated injector is more suitable for common rail injection system due to its fast response and is expected to replace current solenoid-operated injector. In this study, nonlinear mathematical models are proposed for the solenoid-operated and the piezo-actuated injectors for control applications. Based on these models, the injection rate, which is one of the most important factors for the injection characteristics, is estimated using sliding mode observer. The simulation results and the experimental data show that the proposed sliding mode observers can effectively estimate the injection timing and the injection rate for both common-rail injectors.

Key Words : Injector model (인젝터 모델), Injection rate (분사율), Solenoid-operated injector (솔레노이드 인젝터), Piezo-actuated injector (피에조 인젝터), Sliding mode observer (슬라이딩모드 관측기)

기호설명

A : area [m^2]	k : Sliding gain
C_d : discharge coefficient	P : Pressure [Pa]
D_3 : electric displacement [C/m^2]	Q : Volumetric flow rate [m^3/s]
E_3 : electric field [V/m]	S_3 : Strain
F : Force [N]	T_3 : Stress [Pa]
	V : Volume [m^3]
	v : Voltage [V]

✉ 접수일: 2007년 4월 10일; 게재승인일: 2007년 7월 3일

* 서일대학 자동차과

** 재단법인 송도테크노파크 부품개발실

교신저자: 한양대학교 자동차공학과

E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr Tel.(02)2220-0453

- x : Displacement [m] or state variable
- ρ : Density of fuel [kg/m^3]

하첨자

- c : Control chamber
- h : Nozzle hole
- i : Inlet orifice
- n : Needle valve
- ns : Needle valve seat
- o : Outlet orifice
- p : Control piston
- pzt : Piezoelectric stack
- r : Rail
- s : Spring or Sac
- v : Control valve
- 0 : Initial state

1. 서론

디젤엔진은 엄격한 배기규제와 저연비 및 고출력 등의 소비자 요구를 만족시키기 위하여 발전되어 왔으며, 커먼레일 연료분사시스템은 이러한 요구조건들을 충족시키기 위한 신기술로써 널리 적용되고 있다.^{1,2,3} 커먼레일 연료분사시스템은 기존의 캠구동방식과는 달리 분사압력생성과 연료분사 과정이 서로 분리되어 있어 연료분사압력은 엔진 회전수 및 연료분사량과는 독립적으로 형성된다. 연료는 고압펌프에 의하여 연료레일로 공급되어 분사대기상태로 되며, 엔진제어기는 엔진의 작동조건에 따라 연료분사량, 분사시기 및 분사압력을 결정하므로 커먼레일 연료분사시스템은 기존의 분사시스템보다 더욱 유연한 제어를 할 수 있다.^{4,5}

인젝터의 분사특성은 커먼레일 디젤엔진의 출력 및 배기가스 성능에 큰 영향을 미치고 있으며, 따라서 최근에는 커먼레일 연료분사시스템에 사용되고 있는 인젝터의 구동방식이 솔레노이드 구동식에서 피에조 구동식으로 바뀌어 가고 있는 추세이다. 피에조 구동방식의 인젝터는 솔레노이드 구동방식의 인젝터보다 빠른 응답성을 나타내며, 더 큰 힘을 발생시킬 수 있다. 이러한 특성으로 인하여 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비하여

높은 연료 압력에서도 정밀한 연료분사량 제어가 가능하다.

이 연구에서는 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터에 대한 수학적모델을 제안하며, 수립된 모델을 기반으로 분사시기 및 분사율을 추정하는 관측기를 설계하고자 한다.

2. 인젝터 모델링

2.1 피에조 인젝터

이 연구에 사용된 피에조 인젝터는 2-웨이밸브 방식으로 Fig. 1 은 피에조 인젝터의 구조를 나타내고 있다. 현재 피에조 인젝터는 커먼레일 시스템에 널리 적용되고 있지는 못하나 가까운 장래에 솔레노이드 인젝터를 대체할 것으로 판단된다. 피에조 구동기는 100~300 개의 얇은 세라믹 소자들이 적층된 피에조스택(piezo stack)으로 구성되며, 세라믹 판 사이에는 양극과 음극의 금속전극이 연결되어 전기적으로는 병렬회로로 구성된다. 피에조스택에 전압을 인가하면 역압전효과(converse piezoelectric effect)에 의하여 각각의 세라믹 소자는 팽창하거나 수축하게 되어 힘을 발생시킨다.⁶ 피에조 구동기가 OFF 인 상태에서는 밸브스프링에 의하여 포핏(control valve)이 포핏밸브를 차단하게 되며, 이에 따라 밸브실(valve chamber), 압력제어실(control chamber) 및 축압실(accumulator chamber)의 압력은 연료레일 압력과 동일한 압력을 유지하게 되어 니들밸브가 분사노즐을 차단하고 연료분사는 발생하지 않는다. 한편, 피에조 구동기에 전압이 인가되면 피에조스택의 축방향 길이가 늘어나게 되어 푸시로드, 밸브피스톤 및 포핏이 아래방향으로 움직이게 된다. 따라서 압력제어실의 고압연료가 출구 오리피스를 통하여 연료탱크로 복귀하게 되며 압력제어실의 압력이 감소되게 된다. 그 결과 압력제어실과 축압실의 압력차에 의하여 니들밸브가 들리면서 분사가 개시된다.

연료분사과정의 동역학은 매우 복잡하나 인젝터 자체에만 한정하여 다음의 가정 하에 인젝터의 수학적모델을 유도한다.⁷

- 피에조 구동기는 선형특성을 나타낸다.
- 연료공급압력의 맥동현상은 무시한다.
- 축압실의 압력은 연료공급압력과 같다.
- 연료 복귀압력은 대기압과 동일하다.
- 가동부의 마찰은 무시한다.

- 제어실 내의 연료는 압축성이다.
- 연료분사시 연소실 내의 압력은 일정하다.

피에조 인젝터의 동적모델은 피에조 구동기 양단의 전압과 전압의 변화율을 입력으로 하고 피에조 구동전류를 출력으로 하는 시스템으로서 피에조스택, 밸브피스톤, 밸브챔버, 압력제어실, 서보피스톤, 니들밸브와 Sac 챔버로 구성된다.

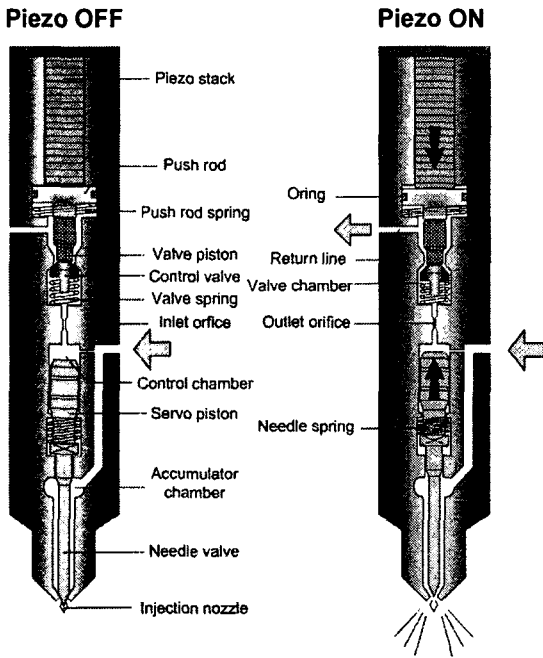


Fig. 1 Cross-sectional view of the piezo-actuated injector

2.1.1 피에조 구동기

인가전압에 대한 피에조스택의 거동은 선형 및 비선형 모델로 나타낼 수 있으나 이 연구에서는 전압인가시 피에조스택에서 발생하는 힘의 크기가 중요한 요소이므로 피에조소자의 거동을 선형으로 나타낸다. 피에조소자의 선형특성은 다음과 같이 표현된다.⁸

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

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

여기서, c_{33} 는 피에조소자의 탄성계수, e_{33} 는 피에조 상수, ϵ_{33} 는 피에조소자의 유전율이다. Fig. 2는 100 개 이상의 피에조소자가 적층되어 전기적으로 병렬회로를 이루는 피에조스택의 개략도이다. 각

피에조소자에 전압 v 가 인가되면 역압전효과에 의하여 피에조소자는 원래 길이 L_1 에서 x_v 만큼 인장된다. 이 때 두께 d , 단면적 A_{pzt} 의 피에조소자가 N 층으로 구성된 피에조스택이 축방향으로 가하는 힘은 식 (3)과 같이 표현된다.⁹

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

식 (2)에서 전기변위 D_3 는 전하량 q 를 피에조소자의 단면적 A_{pzt} 로 나눈 양이다. 변형율 S_3 는 늘어난 길이의 비율이며, 전기장 E_3 는 인가된 전압 v 를 피에조스택의 길이로 나눈 양이므로 이들을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 피에조스택에 충전되는 전하량 q 를 유도할 수 있다.

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

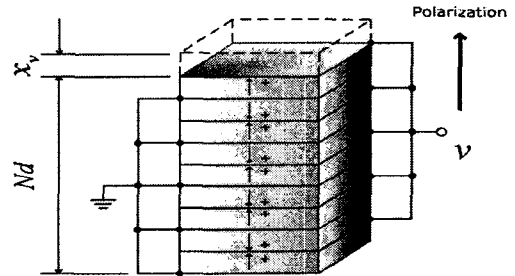


Fig. 2 Configuration of the piezo-stack

2.1.2 밸브 피스톤

밸브피스톤은 피에조스택에 의하여 발생된 힘을 전달받아 포핏밸브를 개폐하여 밸브챔버의 압력을 조절하는 기능을 한다. 밸브피스톤의 거동은 피에조스택의 힘, 스프링력, 압력차에 의하여 결정되며 지배방정식은 식 (5)와 같다.

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

2.1.3 밸브 챔버

밸브챔버의 압력은 피에조스택에 전압이 인가되지 않은 경우 연료레일압력과 동일하게 유지된다. 엔진제어유닛에 의하여 피에조스택에 전압이 인가되면 발생된 피에조스택의 힘이 푸시로드, 밸브피스톤 및 포핏에 전달되어 포핏밸브가 열리고

유량의 유·출입이 생긴다. 유출된 연료는 리턴라인을 통하여 연료탱크로 복귀된다. 밸브챔버에 연속방정식을 적용하면 밸브챔버 내의 압력은 식 (6)과 같이 미분방정식 형태로 표현된다.¹⁰

$$\dot{P}_v = \frac{\beta_v}{V_v} (Q_o - Q_r + \dot{V}_v) \quad (6)$$

여기서, β_v 는 연료의 체적탄성계수이다.

2.1.4 압력제어실

압력제어실의 압력은 입구 및 출구 오리피스의 유량 비율에 따라 결정되며 연속방정식은 식 (7)과 같다.

$$\dot{P}_c = \frac{\beta_c}{V_{co} - A_p x_n} (Q_i - Q_o + A_p \dot{x}_n) \quad (7)$$

2.1.5 서보 피스톤과 니들 밸브

서보피스톤과 니들밸브의 거동은 압력제어실과 축압실의 압력차에 의하여 결정되며, 스프링력과 압력차에 의한 힘이 작용되어 식 (8)과 같이 표현된다.

$$(m_n + m_p)\ddot{x}_n = -k_n(x_{nf} - x_{no} + x_n) - b_n\dot{x}_n - A_p P_c + (A_n - A_{ns})P_{rail} \quad (8)$$

여기서, A_n 은 니들의 단면적, A_{ns} 는 니들시트의 단면적이다.

2.1.6 Sac 챔버

Sac 챔버의 압력은 서보피스톤과 니들밸브의 변위에 따라 변화하며, Sac 챔버와 실린더의 압력차로 인하여 연료분사를 수행한다. Sac 챔버에 연속방정식을 적용하면 식 (9)와 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{P}_s = \frac{\beta_s}{V_s} (Q_{si} - Q_{so} - \dot{V}_s) \quad (9)$$

2.2 솔레노이드 인젝터

Fig. 3은 현재 커먼레일 연료분사시스템에 널리 적용되고 있는 2-웨이밸브 방식의 솔레노이드 인젝터의 구조를 나타내고 있다. 솔레노이드가 작동하지 않는 경우 밸브스프링에 의하여 아마추어의 볼

이 출구 오리피스를 차단하여 압력제어실의 압력은 연료레일의 압력과 동일한 상태가 된다. 이 압력은 서보피스톤의 상부에 작용하게 되며 노즐 스프링력과 함께 니들밸브를 아래로 누르게 되어 연료분사는 발생하지 않는다. 솔레노이드가 작동하는 경우 솔레노이드의 흡인력으로 인하여 아마추어가 상승하여 출구 오리피스가 열리고 압력제어실의 압력은 감소하게 된다. 그 결과 압력제어실과 축압실의 압력차에 의하여 니들밸브가 상부로 들어올러지면서 연료분사가 개시된다. 솔레노이드 인젝터의 동적모델은 솔레노이드 양단의 전압을 입력으로 하고, 솔레노이드 구동전류를 출력으로 하는 단일 입·출력 시스템으로서 솔레노이드, 아마추어, Hollow 챔버, 압력제어실, 서보피스톤, 니들밸브와 Sac 챔버로 구성된다.

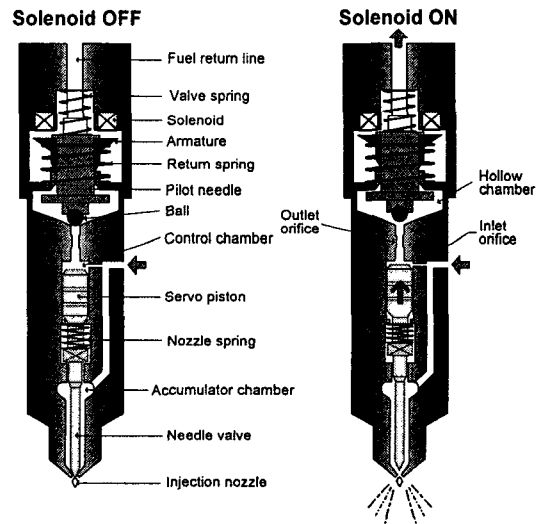


Fig. 3 Cross-sectional view of the solenoid-operated injector

2.2.1 솔레노이드

솔레노이드에 작용하는 전압은 Kirchhoff의 전압법칙에 의하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = iR + d\lambda / dt \quad (10)$$

여기서, i 는 구동전류, R 은 코일저항, λ 는 코일의 Flux linkage를 각각 나타낸다. Flux linkage는 코일의 구동전류와 아마추어변위의 함수로 표현되며 실험을 통하여 구할 수 있다. λ 의 미분을 포함한 형태로 식 (10)을 다시 쓰면 식 (11)과 같다.

$$V = iR + L(i, x_a) \frac{di}{dt} + E(i, x_a) \frac{dx_a}{dt} \quad (11)$$

여기서 $L(i, x_a) = \partial \lambda(i, x_a) / \partial i$ 이고, $E(i, x_a) = \partial \lambda(i, x_a) / \partial x_a$ 이다. 식 (11)에서 우변의 첫번째 항은 저항에 의한 전압강하, 두번째 항은 전류변화에 의한 유도전압, 세번째 항은 역기전력을 각각 나타낸다. 따라서 전류의 변화율은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - iR - E(i, x_a) \cdot dx_a / dt}{L(i, x_a)} \quad (12)$$

2.2.2 아마추어

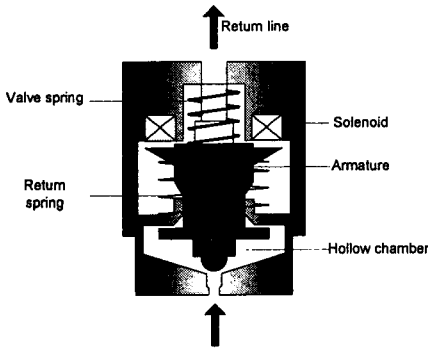


Fig. 4 Operation of the armature

아마추어는 Fig. 4 와 같이 솔레노이드의 흡인력에 의해 구동되면서 출구 오리피스를 개폐하여 제어실의 압력을 조절하는 역할을 하며, 솔레노이드에 의한 자기력과 스프링력 및 압력차에 의한 힘이 작용한다. 아마추어에 대한 지배방정식은 식 (13)과 같다.

$$m_a \ddot{x}_a = A_a \Delta P_i + F_{mag} - m_a g \cos \theta - F_{sv} - F_{sr} - b_a \dot{x}_a \quad (13)$$

여기서, A_a 는 아마추어 면적, ΔP_i 는 아마추어 챔버 압력과 대기압의 차압, F_{mag} 는 솔레노이드 흡인력, F_{sv} 는 밸브 스프링력, F_{sr} 는 리턴스프링력, m_a 는 아마추어 질량, g 는 중력가속도, x_a 는 아마추어 변위, θ 는 인젝터의 장착각도를 각각 나타낸다.

솔레노이드 인젝터의 유압서브시스템 모델은 피에조 인젝터의 유압서브시스템 모델과 동일한 형태로 표현된다.¹³

3. 실험장치

Fig. 5 는 인젝터의 분사특성실험을 위하여 구성된 실험장치의 간략도이며, 실험장치는 인젝터 성능시험기(Injector test bench), 자료획득장치 및 분사율 측정기(Injection rate meter)로 구성된다. 이 실험장치는 실제 차량의 커먼레일 연료분사시스템과 동일한 작동조건을 재현할 수 있으며, 레일압력을 1,400 bar 까지 조절할 수 있도록 제작된 커먼레일 분사시스템의 성능실험 장치이다. 이 연구에서는 엔진의 다양한 운전조건을 고려하여 레일압력을 설정한 후 전압, 전하량 및 분사율을 측정한다. 커먼레일 압력을 100 ~ 1,400 bar 범위 내의 일정한 값으로 유지한 상태에서 펄스발생기(Pulse generator)가 분사신호를 보내면 인젝터 드라이버(Injector driver)가 인젝터에 전류를 인가하여 인젝터의 구동부인 솔레노이드 또는 피에조스택을 작동시키게 된다. 분사실험시 인젝터에 인가되는 전압, 전류 및 분사율은 NI사에서 개발된 자료획득보드 및 LabVIEW에 의하여 측정한다. 연료분사율 측정을 위하여는 Ono-sokki사에서 제작한 FJ400 모델의 분사율 측정기를 사용하고, 펄스발생기는 자체 제작하였다.

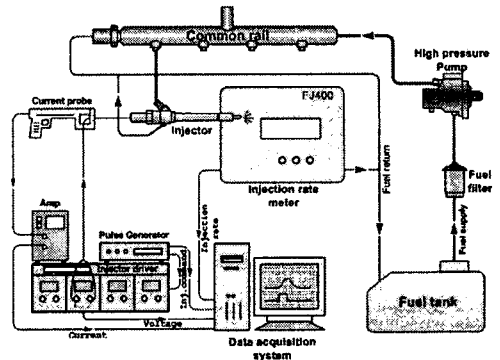


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

4. 인젝터 모델 검증

이 연구에서 제안된 인젝터의 수학적모델을 검증하기 위하여 레일압력에 따른 인젝터의 구동 전류 또는 전하량과 연료분사율의 측정결과와 인젝터 모델에 의한 시뮬레이션 결과를 비교한다.

Fig. 6 은 피에조 인젝터에 대한 검증결과로 연

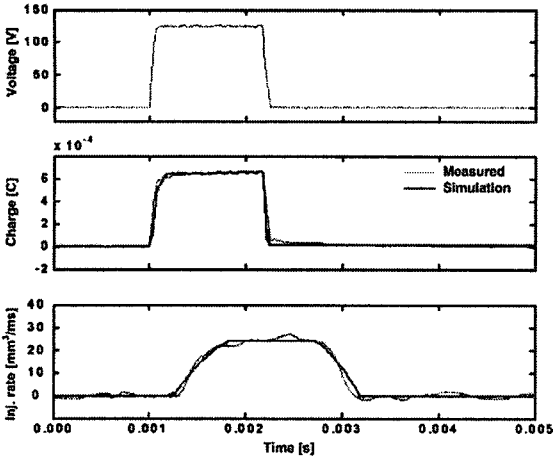


Fig. 6 Model validation of the piezo-actuated injector

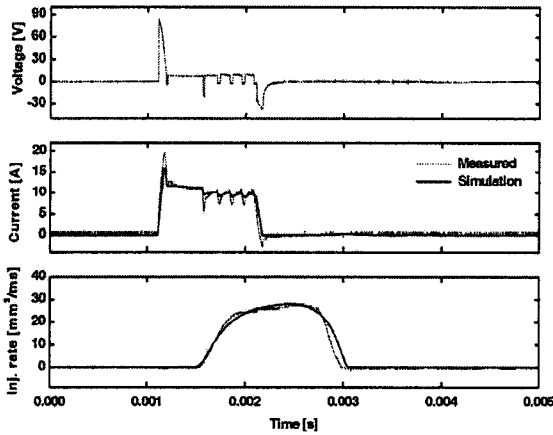


Fig. 7 Model validation of the solenoid-operated injector

료압력 1,100 bar, 분사기간 1.2 ms 인 경우 피에조 구동부의 전하량과 연료분사율의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 6 에 나타난 바와같이 전하량의 해석결과와 실험결과는 잘 일치하고 있으나, 연료분사율의 해석결과와 실험결과는 약간의 오차가 발생하고 있다. 이것은 분사실험시 연료레일의 압력변화에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 솔레노이드 인젝터에 대한 검증결과로 연료압력 1,100 bar, 분사기간 1 ms 인 경우 인젝터의 전류와 연료분사율의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 관측기 설계

대부분의 현대 제어이론들은 상태변수에 관한 정보를 필요로 하며, 이를 위해서는 각 상태변수와 관련된 물리량을 직·간접적으로 측정할 수 있는 센서들이 필요하다. 그러나 이러한 물리량의 측정에 사용되는 센서들은 고가이거나 또는 양산 제품의 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. 관측기는 제어시스템의 출력을 이용하여 상태변수를 추정하는 수학적인 알고리즘으로, 센서리스 제어에 많이 이용되고 있다.

선형시스템에 적용 가능한 Luengerber 관측기를 기반으로 하여 인젝터의 분사과정과 같은 비선형 시스템의 상태변수 추정을 위한 많은 연구가 있어 왔으며,¹¹ 그 중 모델링 오차를 고려할 수 있는 슬라이딩 관측기가 비선형시스템의 상태변수 추정에 많이 이용되고 있다.¹² 연료분사시스템에 대한 슬라이딩 관측기는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}, u) + k_1 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2(\hat{x}, u) + k_2 \operatorname{sgn}(x_2 - \hat{x}_2) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{x}}_8 &= f_8(\hat{x}, u) + k_8 \operatorname{sgn}(x_8 - \hat{x}_8) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, \hat{x}_i 는 관측된 상태변수이며, k_i 는 슬라이딩 계인이다. 상태변수의 추정오차를 식 (15)와 같이 정의하면, 분사율 관측기의 오차동역학은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x - \hat{x} \\ \dot{\tilde{x}}_1 &= \Delta f_1 - k_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \Delta f_2 - k_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{x}}_8 &= \Delta f_8 - k_8 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_8) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $\Delta f_i = f_i(x, u) - f_i(\hat{x}, u)$, $i = 1, \dots, 8$

슬라이딩 함수를 식 (17)의 형태로 정의하면, 출력 오차에 대한 슬라이딩 조건은 식 (18)과 같

게 된다.

$$s = \tilde{x}_1 \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} s^2 \right) = \tilde{x}_1 (\Delta f_i - k_i \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1)) < -\eta_i |s| \quad (18)$$

슬라이딩 조건을 만족시키기 위하여 k_i 를 식 (19)과 같이 선정하면 추정오차 \tilde{x}_1 은 0 으로 수렴하는 슬라이딩 면에 도달하게 되어 측정된 시스템의 출력으로부터 상태변수 $x(t)$ 를 추정하는 것이 가능하게 된다.

$$k_i > \eta_i + |\Delta f_i| \quad (19)$$

Fig. 8 은 피에조 인젝터에 대하여 레일압력 1,000 bar, 분사기간 1.2 ms 인 경우 연료분사율의 실험결과와 관측기를 이용한 추정결과를 나타내고 있으며, Fig. 9 는 솔레노이드 인젝터에 대하여 레일압력 1,300 bar, 분사기간 1.0 ms 인 경우 연료분사율의 실험결과와 관측기를 이용한 추정결과를 나타내고 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 로부터 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터에 대하여 분사율 추정결과와 실험결과가 약간의 오차가 발생하고는 있으나 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10 은 피에조 인젝터에 대하여 다중분사시의 실험 및 해석결과로 레일압력 1,100 bar, 파일럿 분사, 주분사 및 후분사 기간이 각각 0.2, 1.2 및 0.5 ms 인 경우 연료분사율의 실험결과와 관측기를 이용한 추정결과를 나타내고 있다. 전하량의 추정 결과는 실험결과와 잘 일치하고 있으나 전하량의 급격한 변화 시에 추정치에서 약 90 μ s의 시간지연이 발생하고 있음을 알 수 있다.

따라서 제안된 관측기는 분사율 및 분사시기를 효과적으로 추정함을 알 수 있다.

6. 결론

이 연구는 커먼레일 연료분사시스템에서 연료 분사량 및 분사시기의 되먹임 제어를 위한 기초연구로서 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 수학적모델을 제시하고 슬라이딩 관측기를 이용하여 연료분사량과 분사시기를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 독특성

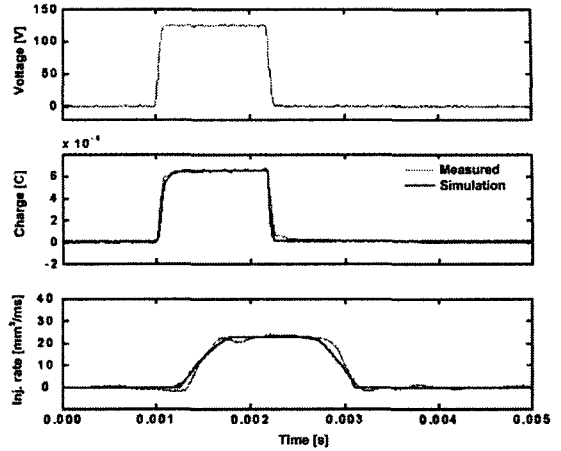


Fig. 8 Observer validation of the piezo-actuated injector

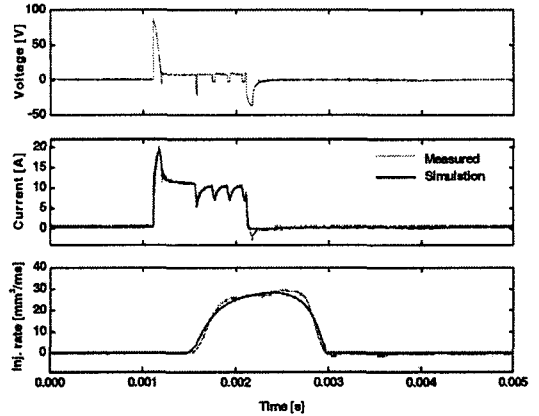


Fig. 9 Observer validation of the solenoid-operated injector

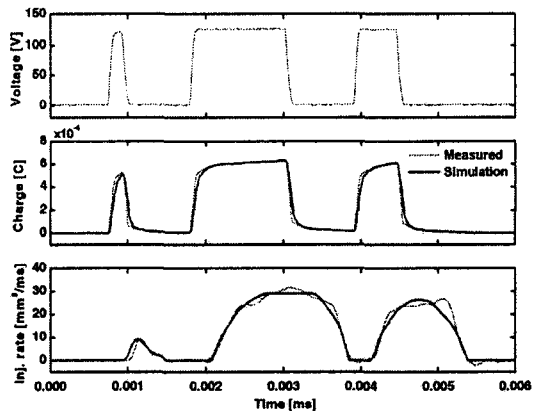


Fig. 10 Observer validation of the piezo-actuated injector

이 반영된 수학적모형을 개발하였다. 개발된 모델은 8 차의 비선형 상태방정식으로 표현되며, 실험 결과를 통하여 검증하였다.

(2) 제안된 인젝터의 수학적모형을 기반으로 연료 분사율 및 분사시기를 추정할 수 있는 관측기를 설계하였으며, 슬라이딩모드 관측기를 사용하여 모델의 불확실성을 극복할 수 있도록 하였다.

(3) 제안된 관측기의 검증결과 피에조 인젝터와 슬레노이드 인젝터에 대한 연료분사율 및 분사시기를 효과적으로 추정하였다.

(4) 비선형 관측기에 대하여 실험을 통한 분사율 추정 알고리즘을 검증함으로써 연료분사량 및 분사시기의 되먹임 제어에 대한 가능성을 입증하였다.

후 기

이 논문은 2005 년도 서일대학 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Stumpp, G and Ricco, M., "Common rail - an attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engines," SAE Paper 960870, 1996.
2. Boehner, W. and Hummel, K., "Common rail injection system for commercial diesel vehicles," SAE Paper 970345, 1997.
3. Nam, K., Park, S. and Sunwoo, M., "Dynamic Model of an HSDI Common-rail Injector and Injection Rate Estimation," Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 43-49, 2003.
4. Guerrassi, N. and Dupraz, P., "A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines," SAE Paper 980803, 1998.
5. Hountalas, T. and Kouremenos, D., "Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines," Advances in Engineering Software, Vol. 29, No. 1, pp. 13-28, 1998.
6. Adriaens, H. J. M. T. S., de Koning, W. L. and Banning, R., "Modeling Piezoelectric Actuators," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 5, Issue 4, pp. 331-341, 2000.
7. Baranowski, D., Klugl, W. and Schoppe, D., "Simulation and Design Optimization of a Common Rail Piezo Injector for Passenger Car DI Diesel Engines," Fuel Injection Systems, pp. 219-232, 1999.
8. ANSI/IEEE Standard 176-1987, "An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity," ANSI/IEEE Standard 176-1987, 1987.
9. Jalili, N., Wagner, J. and Dadfarnia, M., "A Piezoelectric Driven Ratchet Actuator Mechanism with Application to Automotive Engine Valves," Mechatronics, Vol. 13, No. 8, pp. 933-956, 2003.
10. Streeter, V. L. and Wylie, E. B., "Fluid Mechanics," McGraw-Hill, 1979.
11. Misawa, E. A. and Hedrick, J. K., "Nonlinear Observers - A State-of-the-Art Survey," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 111, No. 3, pp. 344-351, 1989.
12. Slotine, J. E., Hedrick, J. K. and Misawa, E. A., "On Sliding Observer for Nonlinear Systems," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, No. 3, pp. 245-252, 1987.
13. Nam, K., Yoon, M., Park, S. and Sunwoo, M., "Development of a Sensorless Estimation Algorithm of the Injection Timing and Rate for an HSDI Common-Rail Injector," JSME International Journal Series C, Vol. 47, No. 3, pp. 882-888, 2004.