

전자제어식 직접분사 디젤엔진의 연료제어를 위한 인젝터 관측기 설계

Observer Design of an Injector for Fuel Control in DI Diesel Engines with an Electronically Controlled Injector

김선우, 이강윤, 정남훈, 선우명호*
(Sunwoo Kim, Kangyoon Lee, Namhoon Chung, and Myounggho Sunwoo)

Abstract : This study presents a mathematical model and a sliding mode observer of the injection system for common rail diesel engines. The injector model consists of three subsystems: the actuator subsystem, the mechanical subsystem, and the hydraulic subsystem. In the actuator subsystem, the constitutive relations of piezoelectricity are used to model the actuator made up of piezoelectric material. Based on the proposed model, the observer estimates the injection rate and injection timing, and can play a vital role of sensorless control of fuel injection in the near future. The sliding mode theory is applied to the observer design in order to overcome model uncertainties. The injector model and observer are evaluated through the injector experiments. The simulation results of the injector model are in good agreement with the experimental data. The sliding mode observer can effectively estimate the injection timing and the injection rate of the injector.

Keywords : common rail diesel engine, injection rate, injection timing, sliding mode observer, piezoelectricity

I. 서론

최근 승용차 및 SUV(Sports utility vehicle)에 장착이 보편화되고 있는 커먼레일 분사시스템(Common rail injection system)의 개발은 디젤차량의 주요한 단점을 보완해주며 고속 직접분사식(HSDI, High speed direct injection) 디젤엔진의 발전에 지대한 공헌을 하였다. 커먼레일 방식은 기존의 방식보다 더 높은 압력의 연료를 다양한 운전조건 하에 유연하게 분사시킬 수 있다. 이러한 커먼레일 장점은 디젤엔진의 유해한 배기배출물질과 소음 및 진동을 저감시킬 뿐만 아니라 엔진 출력을 향상시킨다[1,2].

디젤엔진의 배기가스 규제가 날로 엄격해짐에 따라 더욱 향상된 성능을 발휘할 수 있는 커먼레일 디젤엔진이 요구되고 있으며, 선진국을 중심으로 차세대 커먼레일 시스템의 개발이 진행되어 일부 자동차부품 업체에서는 이를 양산 중에 있다. 차세대 커먼레일 시스템에서는 기존의 인젝터의 구동 방식인 솔레노이드 구동식보다 성능이 향상된 피에조 구동식 인젝터를 채택하고 있다. 피에조 구동방식의 인젝터(Piezo-actuated injector)는 솔레노이드 구동방식의 인젝터(Solenoid-actuated injector)보다 빠른 응답시간을 나타내며, 더 큰 구동력을 발생시킬 수 있다. 이러한 피에조 구동 방식의 특성으로 인하여 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비하여 높은 연료 압력에서 정밀한 분사량 제어가 가능하다[3].

이 연구의 목적은 차세대 커먼레일 인젝터인 피에조 인젝터의 수학적 모델을 수립하고, 피에조 인젝터의 연료분사시기와 분사율에 대하여 센서를 사용하지 않고 추정하는 것이다. 인젝터의 모델은 피에조 구동기 모델, 기계 요소 모델,

유압 모델의 하부 모델로 구성된다. 피에조 구동기 모델에는 1차원 선형 피에조 구성 방식이 적용된다.

인젝터의 수학적 모델을 기반으로 인젝터의 상태변수(State variable)를 추정하는 관측기(Observer)가 설계된다. 관측기에는 인젝터 모델의 불확실성(Model uncertainty)을 극복하기 위하여 슬라이딩 모드 이론(Sliding mode theory)이 채용된다. 피에조 인젝터의 모델과 관측기는 인젝터 성능실험을 통하여 검증된다.

II. 커먼레일 연료분사 시스템

커먼레일 연료분사시스템은 일반적으로 고압 발생을 위한 고압 펌프, 고압 연료를 축적하는 커먼레일, 전자제어식 인젝터, 각종 센서 및 압력 조절 밸브와 전자제어장치(ECU) 등의 요소로 구성된다[2]. 그림 1은 커먼레일 연료분사 시스템의 개략도를 나타낸다. 연료는 기관으로 구동되는 고압 펌프(High pressure pump)에 의하여 커먼레일에 저장되며, ECU의 분사신호에 따라 인젝터를 통하여 연소실 내로 분사 된다.

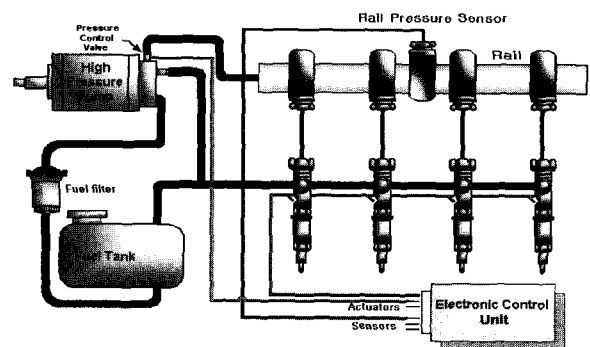


그림 1. 커먼레일 연료 분사시스템.
Fig. 1. Common rail fuel injection system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 10. 25 채택확정 : 2004. 11. 11.

김선우, 이강윤, 정남훈, 선우명호 : 한양대학교 자동차공학과

(sunwoo@ihanyang.ac.kr/bikeman@ihanyang.ac.kr/armax1961@empal.com/msunwoo@hanyang.ac.kr)

커먼레일은 일정한 압력의 연료를 고압 파이프를 통하여 인젝터로 공급하며, 연료 축압(Fuel accumulation) 기능과 압력 파를 감쇠하는 역할을 수행한다. 인젝터는 ECU에 의하여 전자 제어 방식으로 구동되므로 커먼레일 연료분사 시스템은 다중분사(Multi-injection)가 가능하며, 각 엔진 사이클당 분사 시기가 조절되어 보다 유연한 분사율 제어를 실현할 수 있다.

III. 피에조 인젝터의 작동원리

이 연구에 사용한 피에조 인젝터는 2-웨이 밸브(2-way valve) 방식이며, 그림 2는 작동원리를 도시한 그림이다. 피에조 구동기는 100~300개의 얇은 세라믹 소자(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 소자는 팽창하거나 수축하게 되어 힘을 발생시킨다[4]. 역압전효과(Converse piezoelectric effect)를 이용한 피에조 인젝터의 작동 과정은 다음과 같다. ECU가 분사신호를 전달하면 인젝터 드라이버가 전압을 발생시켜 피에조 구동기에 인가한다. 인가된 전압에 의하여 피에조 스택(Piezo stack)의 상하방향 길이가 증가하여 제어 밸브(Control valve)가 열리는 방향으로 이동한다. 이때 압력제어실(Control chamber)의 압력이 감소되어 축압실 (Accumulator chamber)과 압력제어실의 압력차에 의하여 니들밸브가 열리면서 분사가 시작된다.

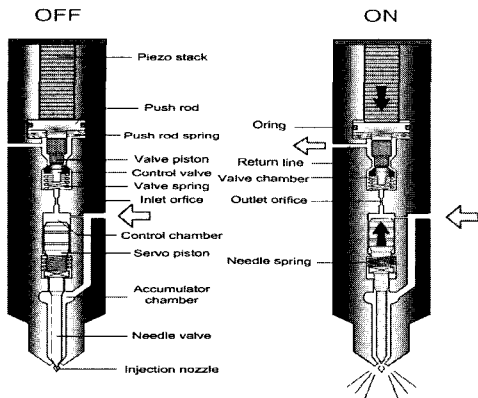


그림 2. 피에조 인젝터의 작동 원리.
Fig. 2. Schematic of the piezo-actuated injector.

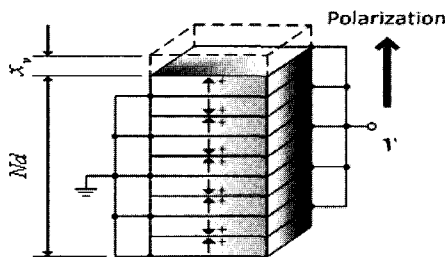


그림 3. 피에조 스택 모델.
Fig. 3. Schematic of a piezo stack.

IV. 인젝터 모델링

피에조 구동식 인젝터의 동적 모델은 피에조 구동기 모델 (Piezo-actuator model), 기계요소 모델(Mechanical model) 및 유압 모델(Hydraulic model)의 세 부분으로 구성된다. 피에조 구동기에 인가되는 전압과 전압의 시간에 대한 변화율을 인젝터 모델의 입력으로, 피에조 스택에 발생하는 전하량을 출력으로 정한다.

연료 분사과정의 동역학은 매우 복잡하나 인젝터 자체에만 한정하여 다음의 가정 하에 인젝터 모델을 유도한다[3],[9].

- 피에조 구동기는 선형특성을 나타낸다.
- 연료 공급압력의 맥동현상은 무시할 수 있다.
- 레일의 용적용량은 무한하다.
- 축압실의 압력은 공급압력과 같다.
- 연료 복귀압력은 대기압과 같다.
- 기동부의 마찰은 무시할 수 있다.
- 연료분사 시 연소실 내의 압력은 일정하다.
- 인젝터 내부의 연료 누설은 무시할 수 있다.
- 니들밸브는 변형되지 않는다.

1. 인젝터 모델 구성

1.1 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[5][6] 이 연구에서는 전압 인가 시 피에조 스택에서 발생하는 힘의 크기가 중요한 요소이므로 피에조 소자의 거동을 선형으로 고려한다.

피에조 소자의 선형특성식은 (1)과 (2)와 같이 표현된다[7].

$$T_3 = c_{33}S_3 - e_{33}E_3 \tag{1}$$

$$D_3 = e_{33}S_3 + \epsilon_{33}E_3 \tag{2}$$

그림 3은 100개 이상의 피에조 소자가 적층되어 전기적으로 병렬회로를 이루고 있는 피에조 스택의 간략도이다. 각 피에조 소자에 전압 v 가 인가되면 피에조의 역전압효과에 의하여 피에조 소자는 원래 길이 Nd 에서 x_v 만큼 연장된다. 두께 d , 단면적 A_{pz} 의 피에조 소자 N 층으로 구성된 피에조 스택이 축방향으로 가하는 힘은 (3)과 같이 표현 된다[4].

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

또한, 피에조 스택에 충전되는 전하량 q 는 (2)로부터 (4)와 같이 유도된다.

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

1.2 기계요소 모델

밸브 피스톤(Valve piston)과 니들 밸브(Needle valve)와 같은 기계요소는 Newton 제2법칙을 따르는 동적 모델로 표현된다. 밸브 피스톤은 피에조 스택에 의하여 발생된 힘을 전달받아 제어밸브를 개폐하여 밸브 챔버(Valve chamber)의 압력을 조절하는 역할을 한다. 밸브 피스톤의 거동은 피에조 스택의 구동력, 압력차, 스프링력에 의하여 결정된다. 밸브 피스톤의 거동에 대한 지배방정식은 (5)와 같다.

$$(m_v + \frac{m_{pz}}{3})\ddot{x}_v = F_{pz} - F_{s_v} - b_v\dot{x}_v - A_v P_v \quad (5)$$

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

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

1.3 유압 모델

질량보존법칙에 의하여 검사체적(Control volume)의 압력은 유입되는 유량과 유출되는 유량 그리고 체적에 의존한다. 그림 4와 같이 단순화된 압력제어실의 모델에 연속방정식을 적용하면, (7)과 같이 압력 제어실의 압력에 대한 미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_c &= \frac{\beta_c}{V_c} (Q_i - Q_o + \dot{V}_c) \\ &= \frac{\beta_c}{V_{c0} - A_p x_n} (Q_i - Q_o + A_p \dot{x}_n) \end{aligned} \quad (7)$$

단, $\beta_c = 12000 \left(1 + 0.6 \frac{P_c}{600} \right)$,

$$Q_i = C_{d_i} A_i \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_r - P_c|}$$

$$Q_o = C_{d_o} A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_c - P_v|}$$

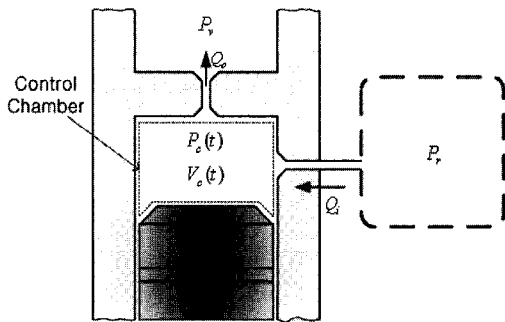


그림 4. 압력 제어실의 유압 모델.
Fig. 4. Hydraulic model of the control chamber.

이와 같은 방법으로 밸브 챔버와 Sac 챔버(Sac chamber)의 유압 모델도 각각 (8)과 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{P}_v = \frac{\beta_v}{V_v} (Q_o - Q_r + \dot{V}_v) \quad (8)$$

$$\dot{P}_s = \frac{\beta_s}{V_{s0} + A_{ns} x_n} (Q_{s_i} - Q_h - A_{ns} \dot{x}_n) \quad (9)$$

2. 인젝터 모델 검증

피에조 인젝터의 수학적 모델은 시뮬레이션 결과와 인젝터 성능실험 결과를 비교하는 방법으로 검증을 추진하였다. 피에조 인젝터 모델을 검증하기 위하여 레일압력 및 연료분사형태의 변화에 따른 인젝터 구동전류와 연료 분사율을 측정하는 기초 실험을 수행한다.

그림 5와 6은 일정한 구동시간과 레일압력의 조건에서 시간에 따른 분사명령(위 그래프)과 분사율(아래 그래프)을 나타낸 그래프이다. 그림 5는 레일압력 600 bar, 구동시간 1.2 ms일 때 분사율의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 측정값과 모델로부터 구한 시뮬레이션 값을 비교하여 보면 분사시점, 분사종료점 및 분사초기와 분사말기의 분사율의 기울기가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

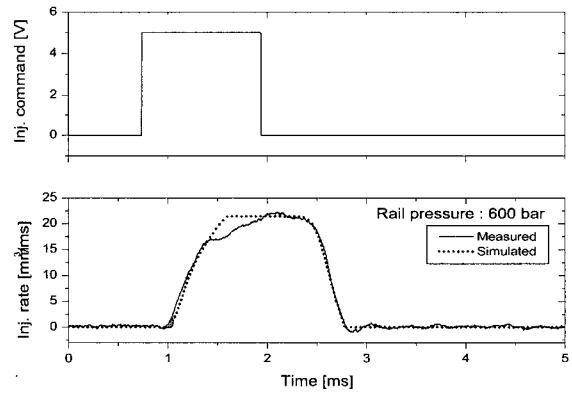


그림 5. 단일분사 시의 분사율 비교.
Fig. 5. The injection rates for a single injection.

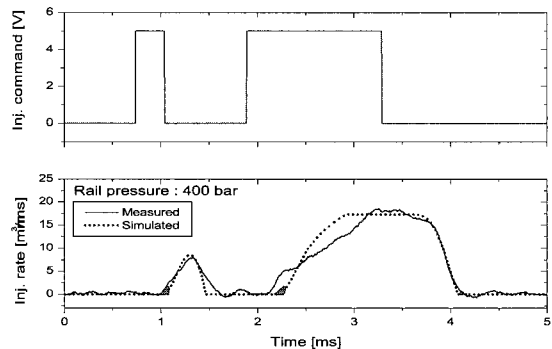


그림 6. 이중분사 시의 분사율 비교.
Fig. 6. The injection rates for a multi-injection.

그러나 분사율 상승 말미에서 분사율 측정값이 시뮬레이션 값보다 작은 값을 보이고 있다. 이는 분사초기에 연료분사로 인한 레일의 압력강하에 기인한 것으로 판단된다. 또한 인젝터 내부의 연료 누수 및 유압 회로 내의 오리피스(Orifice)의 입구와 출구 사이의 높은 압력차에서 기인하는 공동현상(Cavitation) 등이 오차를 발생시킨 것으로 판단된다. 그러나 분사초기에 발생하는 레일의 압력강하는 0.8 ms 후 고압 연료펌프에 의하여 시험시 설정된 분사압력인 600 bar로 즉시 회복되어 측정값과 시뮬레이션값 사이의 오차가 작아지게 된다.

그림 6은 레일압력 400 bar에서 구동기간 0.3 ms의 파일럿 분사(Pilot injection)와 구동기간 1.4 ms의 주분사(Main injection)로 이루어진 이중분사 조건에서의 결과를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 파일럿 분사초기와 주분사 말기의 분사율 기울기가 잘 일치하고 있으나, 파일럿분사로 인하여 레일의 압력강하가 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. 주분사가 끝난 이후에 나타나는 분사율 측정값의 떨림현상은 분사율측정기(Injection rate meter)의 측정오차에 기인하는 것으로 추정된다. 주분사만 있는 경우와 파일럿과 주분사가 있는 경우 모두 작은 오차를 발생하나, 제시된 인젝터 모델은 각 경우에 있어 분사율의 전반적인 특성을 잘 반영하고 있다.

V. 관측기 설계

1. 상태변수 관측기

대부분의 현대 제어이론들은 상태변수에 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 관측기이다. 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 검증한다.

2. 분사시기 및 분사율 관측기 설계

관측기는 시스템의 선형성 및 비선형성에 의하여 설계방법이 다르게 되며, 인젝터의 분사과정은 오리피스를 통과하는 연료의 유동방정식을 포함하고 있어 비선형특성을 나타낸다. 이전에 다양한 비선형 시스템에 대하여 상태변수를 추정하기 위한 연구가 있었으며 그 중에서도 시스템의 모델링 오차를 고려할 수 있는 슬라이딩 관측기가 비선형 시스템의 상태변수 추정에 많이 이용되었다[8].

이 연구에서는 피에조 인젝터를 8개의 상태변수, 2개의 입력 및 1개의 출력을 갖는 비선형시스템으로 고려하였다. (10)과 같이 인젝터의 상태방정식을 표현했을 때, 분사율을 추정하기 위한 슬라이딩 관측기는 (11)과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = f(x, u) \text{ 혹은}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{A_{pz}}{d}(e_{33}x_3 + Ne_{33}u_2) \\ x_3 \\ \frac{(A_{pz}/d)(e_{33}u_1 - c_{33}x_2/N) - F_s(x_2) - b_v x_3 - A_{pp}x_4}{m_v + m_{pz}/3} \\ \frac{\beta_v(x_4)}{V_v}(Q_o(x_4, x_5) - Q_r(x_4) + \dot{V}_v) \\ \frac{\beta_c(x_5)}{V_c(x_6)}(Q_r(x_5) - Q_o(x_4, x_5) + A_p x_7) \\ x_7 \\ \frac{-F_s(x_6) - b_n x_7 - A_{pp}x_5 + (A_n - A_{ns})P_r}{m_n + m_p} \\ \frac{\beta_s(x_8)}{V_s(x_6)}(Q_{si}(x_8) - Q_{so}(x_8) - A_{ns}x_7) \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} \text{단, } x &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T \\ &= [q \ x_v \ \dot{x}_v \ P_v \ P_c \ x_n \ \dot{x}_n \ P_s]^T, \\ u &= [u_1 \ u_2]^T \\ &= [v \ \dot{v}]^T \end{aligned}$$

여기서 ^기호는 상태변수의 관측된 값을 나타낸다. 상태변수의 추정오차를 (12)와 같이 정의하면 분사율 관측기의 오차동역학은 (13)과 같이 표현된다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1(t) &= \Delta f_1 - k_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2(t) &= \Delta f_2 - k_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{x}}_8(t) &= \Delta f_8 - k_8 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \end{aligned} \quad (13)$$

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

슬라이딩 함수를 (14)의 형태로 정의하면 슬라이딩 조건은 (15)와 같아지게 된다.

$$s(t) = \tilde{x}_1(t) \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}s^2\right) = \dot{s}s < -\eta|s| \quad \text{or} \quad \dot{s} = -\eta \text{sgn}(s) \quad (15)$$

슬라이딩 조건을 만족시키기 위하여 슬라이딩 게인(Sliding gain)을 (16)과 같이 선택할 수 있다.

$$k_i > \eta_i + \phi_i, \quad i = 1, \dots, 8. \quad (16)$$

(16)에 의하여 상태변수 추정오차는 0으로 수렴되는 슬라이딩면에 도달된다. 따라서 측정된 시스템의 출력으로부터 상태변수 추정이 가능하게 된다.

VI. 실험 장치

그림 7은 인젝터 성능실험장치를 나타낸 사진이다. 성능실험장치는 인젝터 성능시험기(Injector test bench), 자료 획득장치 및 ONO SOKKI사 제품의 분사율 측정기(Injection rate meter) 등으로 구성되며, 실제 커먼레일 분사시스템과 동일한 운전조건을 재현하도록 설계되었다. 레일압력은 최고 1400 bar까지 조절할 수 있도록 제작되었다. 이 연구에서는 다양한 운전 조건을 고려하여 레일 압력과 분사형태를 변화시켜 가면서 인젝터에 가해지는 전압, 전류 및 분사율을 측정한다.

VII. 실험 결과

피에조 인젝터 상태변수 관측기의 성능 검증실험은 인젝터 모델 검증을 위한 기초실험과 유사한 분사조건에서 실시하였으며, 주분사만 있는 경우와 파일럿 분사가 포함된 경우에 대하여 레일압력을 변화시키면서 실험하였다. 먼저 피에조 인젝터 시스템의 입력과 출력인 피에조 인가 전압과 피에조 스택에 축적된 전하량을 측정 후, 시스템의 입력과 출력의 정보를 이용하여 관측된 분사율과 실제 실험에서 측정된 분사율을 비교하는 방법으로 관측기를 검증한다.

그림 8, 9 및 10은 구동기간 1.2 ms의 단일분사 시의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타내며, 레일압력은 각각 400, 600, 800 bar이다. 그림 11, 12는 구동기간 1.4 ms의 주분사에 구동기간 0.3 ms의 파일럿분사가 포함된 이중분사 시의 실험 및



그림 7. 인젝터 실험 장치.
Fig. 7. The injector test bench.

시뮬레이션 결과를 나타내며, 레일압력은 각각 400, 600 bar이다. 그림 8~12에서 각 그림의 첫 번째 그래프는 입력 전압, 두 번째 그래프는 피에조 스택에 축적된 전하량, 마지막 그래프는 분사율을 시간 축에서 나타낸 것이다. 또한, 실제 디젤엔진에서 800 bar이상 고압의 레일압력 조건에서 이중분사하는 경우가 드물기 때문에 800 bar 조건의 이중분사는 실험하지 않았다. 모든 실험 조건에서 슬라이딩 관측기의 출력인 피에조 스택의 전하량은 실험시 측정된 전하량과 잘 일치하고 있으나, 전하량 상승시 채터링(Chattering)에 의하여 약간의 오차가 발생하고 있다. 또한, 그림 9부터 그림 11까지의 실험조건에서 분사율의 측정결과와 추정결과는 인젝터 모델이 가지고 있는 모델 근사화에 기인하는 오차 이외에 다른 오차가 거의 없음을 나타내고 있다. 그림 8과 12의 분사율 그래프에서는 각각 분사초기, 분사말기에 측정된 분사율과 추정된 분사율 사이에 오차가 발생하고 있으며, 이러한 현상은 높은 레일압력에 의한 인젝터 내부의 연료 누유와 오리피스 양단의 높은 압력차에 기인한 공동현상 발생으로 유량계수의 급격한 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

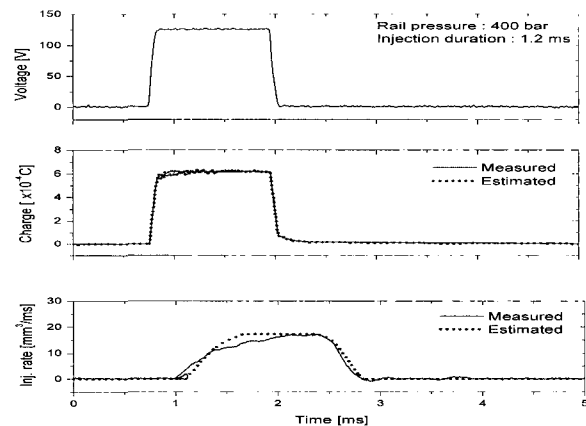


그림 8. 단일분사시 실험 및 해석 결과(400 bar).
Fig. 8. Comparison between estimation and experiment(Rail pressure =400 bar).

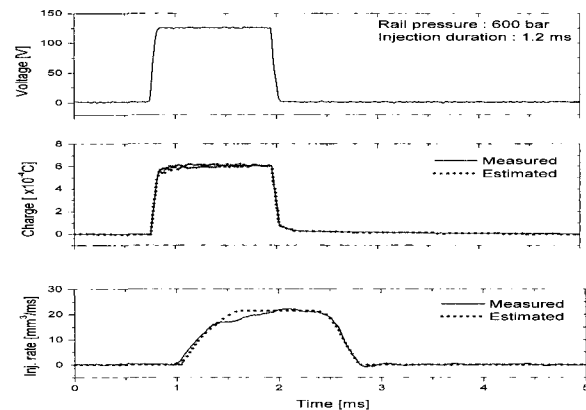


그림 9. 단일분사시 실험 및 해석 결과(600 bar).
Fig. 9. Comparison between estimation and experiment(Rail pressure =600 bar).

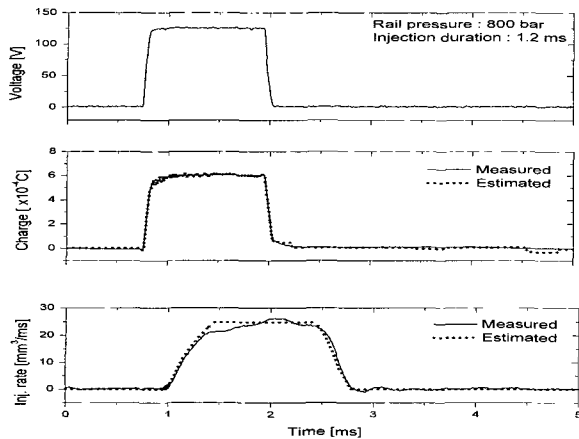


그림 10. 단일분사시 실험 및 해석 결과(800 bar).
 Fig. 10. Comparison between estimation and experiment(Rail pressure =800 bar).

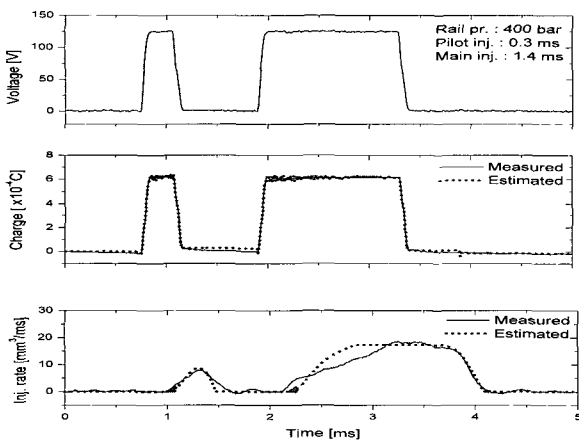


그림 11. 이중분사시 실험 및 해석 결과(400 bar).
 Fig. 11. Comparison between estimation and experiment(Rail pressure =400 bar).

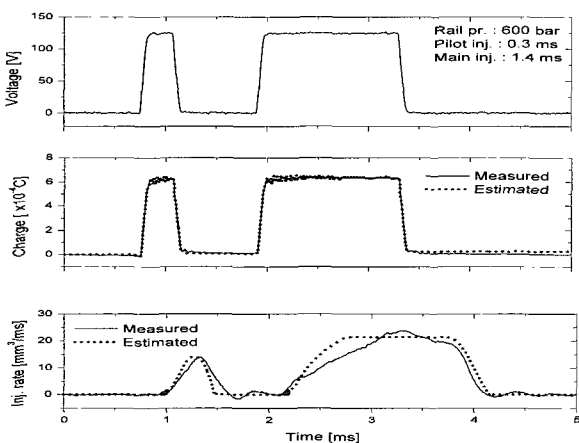


그림 12. 이중분사시 실험 및 해석 결과(600 bar).
 Fig. 12. Comparison between estimation and experiment(Rail pressure =600 bar).

그림 11, 12의 파일럿 분사가 포함된 경우에는 모델검증시 언급한 바와 같이 파일럿 분사후 주분사 초기의 분사율 상승 구간에서 오차가 관찰되고 있으나, 연료분사량으로 환산시 오차는 3% 이하로 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 분사율 관측기는 이중분사시에 나타나는 상태변수의 급격한 변화를 적절히 추정하고 있음을 알 수 있으며, 이 연구에서 제시된 분사율 관측기는 다양한 운전조건 하에서 적절한 추정성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

VIII. 결론

이 연구는 피에조 인젝터를 장착한 커먼레일 연료분사시스템에 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 역압 전효과 및 인젝터의 동특성이 반영되도록 구성하였으며, 모델링 오차에 강인성을 갖는 슬라이딩 관측기를 적용하기에 적합하도록 구성되었다.
- 2) 인젝터의 수학적 모델은 8차의 비선형 미분방정식으로 제시하였다. 실험을 통하여 파일럿분사가 없는 경우에는 분사시기의 오차가 30 μ s 미만, 분사율의 오차가 최대값 기준 2% 미만, 분사량의 오차가 3% 미만의 모델임을 검증하였다.
- 3) 인젝터 모델을 기반으로 분사율을 추정하는 슬라이딩 관측기의 알고리즘을 제시하였다. 분사율 관측기는 400-800 bar의 레일압력하의 여러 분사조건에 대하여 적절한 관측성능을 나타내었다.
- 4) 관측기 성능검증을 통하여 디젤 엔진용 피에조 인젝터의 연료분사량 및 분사시기의 되먹임 제어 가능성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] G. Stumpp, M. Ricco, "Common rail—an attractive fuel injection system for passenger car DI Diesel engines", *SAE paper 960870*, 1996.
- [2] W. Boehner, K. Hummel, "Common rail injection system for commercial diesel vehicles", *SAE paper 970345*, 1997.
- [3] D. Baranowski, W. Klugl, 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.
- [4] N. Jalili, J. Wagner, 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. Koning, R. Banning, "Modeling piezoelectric actuators", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 5, no. 4, 2000.
- [6] M. Goldfarb, N. Celanovic, "Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation", *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 17, pp. 69-79, 1997.
- [7] An American National Standard: IEEE Standard on Piez

oelectricity, *ANSI/IEEE Standard* 176-1987, 1987.

[8] J. E. Slotine, J. K. Hedrick, E. A. Misawa, "On sliding observer for nonlinear systems", *Trans, ASME, Journal of Dyn. Syst., Meas., and Contr.*, vol. 109, Sept., 1987.

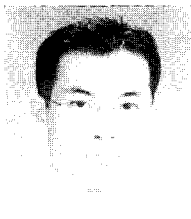
[9] 남기훈, 박승범, 선우명호, "HSDI 커먼레일 인젝터 동적 모델 및 분사율 추정", *한국자동차공학회 논문집* vol. 11, no. 5, pp. 43-49, 2003.

NOMENCLATURE

1. SYMBOLS

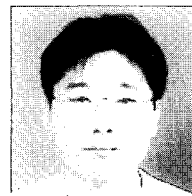
- A Sectional area [m²]
- C_d Discharge coefficient
- D_3 Electric displacement [C/m²]
- E_3 Electric field [V/m]
- F Force [N]
- P Pressure [Pa]
- Q Volumetric flow rate [m³/s]
- S_3 Strain
- T_3 Stress [Pa]
- V Volume [m³]
- b Viscous friction coefficient [N·s/m]
- c_{33} Electric stiffness constant

- e_{33} Piezoelectric constant
 - k Sliding gain
 - m Mass [kg]
 - q Electric charge [C]
 - v Voltage [V]
 - x Displacement [m] or state variable
 - β Bulk modulus [N/m²]
 - ϵ_{33} Dielectric constant
 - ρ Density of fuel [kg/m³]
2. SUBSCRIPTS
- c Control chamber
 - h Nozzle hole
 - i Inlet orifice
 - n Needle valve
 - ns Needle valve seat
 - o Outlet orifice
 - P Control piston
 - pZ Piezo stack
 - r Rail
 - s Spring or Sac
 - v Control valve
 - 0 Initial state



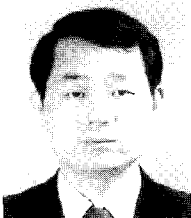
김 선 우

2000년 한양대학교 기계·정밀기계·기계 설계·자동차공학과 졸업. 2003년~현재 한양대학교 대학원 자동차공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 디젤엔진제어, 연료분사제어.



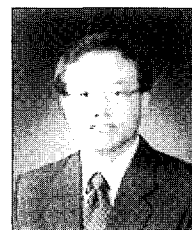
이 강 운

1997년 한양대학교 자동차공학과 (공학사). 1999년 한양대학교 자동차공학과(공학석사). 1999년~현재 한양대학교 대학원 자동차공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 디젤엔진제어, 하이브리드 자동차 제어.



정 남 훈

1983년 한양대학교 기계공학과 (공학사). 1985년 한양대학교 기계공학과 (공학석사). 1999년~현재 한양대학교 대학원 자동차공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 엔진 전자제어, 시스템 모델링.



선 우 명 호

1953년 3월 30일생. 1979년 한양대학교 전기공학과 (공학사). 1983년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과(공학석사). 1990년 Oakland Univ. 시스템공학과(공학박사). 1993년~현재 한양대학교 자동차공학과 교수. 관심분야는

자동차전자제어.