

# HSDI Common-Rail 인젝터 모델링 및 니들 변위 추정에 관한 연구

## A Study on the Model of an HSDI Common-Rail Injector and the Estimation of Needle Lift

성경훈\*, 박승범\*, 선우명호\*\*, 나형규\*\*\*  
Kyunghoon Sung, Seungbum Park, Myoungcho Sunwoo, Hyungkyu Na

### ABSTRACT

This paper presents the process of the needle lift estimation of a common-rail injector for HSDI(High Speed Direct Injection) diesel engines. A nonlinear mathematical model of dynamic behaviors of common-rail injector is established at first. Based on the mathematical model of the common-rail injector, the methodology of estimating the injector needle lift is introduced. A sliding mode observer is applied to overcome the model uncertainties. The common-rail injector model and the needle lift estimator are verified by simulations and experiments. The simulation and experimental results indicate that the model outputs are in a good agreement with experimental data, and the proposed nonlinear sliding observer can effectively estimate the needle lift.

주요기술용어 : Common-rail(커먼레일), Injector(인젝터), Needle lift(니들 변위), Solenoid(솔레노이드), Observer(관측기)

### Nomenclature

$A$	: area[m <sup>2</sup> ]
$b_p$	: damping coefficient[Ns/m]
$F_{mag}$	: magnetic force[N]
$k$	: spring constant[N/m]
$K$	: sliding gain
$m$	: mass[kg]
$P$	: fuel pressure[bar]
$Q$	: volumetric flow rate[m <sup>3</sup> /s]
$V$	: volume[m <sup>3</sup> ]
$v$	: voltage[V]
$\beta$	: bulk modulus of compressibility of fuel[N/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	: flux linkage[Wb]

$\theta$  : installation angle of injector[rad]

### Subscripts

a	: armature
c	: control chamber
p	: control piston
n	: needle valve

### 1. 서론

Common-rail 연료분사 시스템은 연료 압력발생부와 연료분사부를 분리할 수 있기 때문에 기존의 디젤 엔진용 연료분사 시스템에 비해 많은 유연성을 가지고 있다.<sup>1,2)</sup> 분사압력은 어느 정도의 범위 내에서 엔진 회전속도와 분사량에 무관하게 선택될 수 있으며, 고압화에 의해 매연

\* 회원, 한양대학교 대학원  
\*\* 회원, 한양대학교 자동차공학과  
\*\*\* 회원, 두원정공

(smoke)저감에 매우 유리한 특징을 가지고 있다. 또한, 전자제어를 통한 최적의 분사시기 및 분사량의 조절로, 동일 출력 성능 하에서 trade-off 관계에 있는 NOx와 입자상 물질(particulate matters)의 저감을 기대할 수 있으며, 파일럿(pilot) 분사에 의해 연소에 의한 소음도 상당부분 감소될 수 있다. Common-rail 방식 연료분사 시스템은 기존 연료분사 시스템에 비해 이와 같은 많은 장점을 제공할 수 있어 최근 승용 HSDI 디젤엔진의 연료분사장치로써 많이 적용되고 있다.

이 연구에서는 common-rail 분사 시스템에서 연료분사량 및 분사시기의 페루프 제어를 위한 기초연구로서, 인젝터의 동적 모델링과 관측기를 이용한 니들 변위 추정 알고리즘을 제시하고, 실험과 시뮬레이션을 통하여 인젝터의 동적 모델과 니들 변위 추정 알고리즘을 검증하고자 하였다.

## 2. Common-rail 연료분사 시스템

### 2.1 Common-rail 연료분사 시스템

Common-rail 연료분사 시스템은 다음과 같은 요소들로 구성된다.

- 고압 발생을 위한 고압 펌프
- 연료를 축압하고 있는 common-rail
- 전자제어식 인젝터
- 각종 센서들과 압력 조절 밸브
- 전자제어장치(ECU)

고압 펌프는 엔진에 의해 구동되며, 여기서 발생된 일정 압력의 연료는 레일을 통해 인젝터로 공급된다. 레일에 부착된 압력 센서에서 연료 압력을 감지하며, ECU에서는 이 신호를 이용하여 압력 조절 밸브를 가동시켜 레일 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 레일은 일정 압력의 연료를 고압관을 통해 인젝터로 공급하며, 연료 축압 기능과 압력파를 감쇠시키는 역할을 한다. 인젝터는 ECU에 의해 전자제어 방식으로 구동되므로 common-rail 연료분사 시스템은 다중 분사(multi-injection)가 가능하며 보다 다양한 형태의 연료 분사를 제어할 수 있다. Fig. 1은

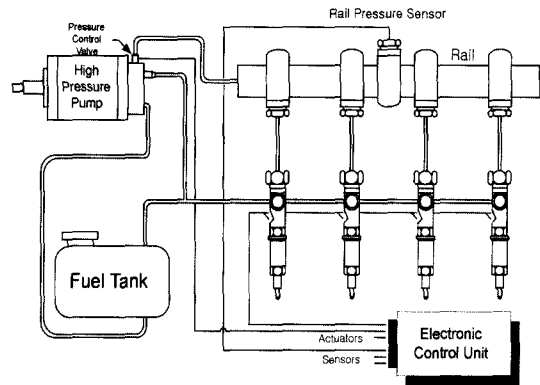


Fig. 1 Common-rail injection system

common-rail 연료분사 시스템의 개략도이다.

### 2.2 Common-rail 인젝터의 작동

이 연구에서는 운전조건에 따른 니들밸브의 변위 측정실험 및 인젝터의 동적 모델링을 위하여 두원정공에서 제작한 2-웨이-밸브 방식의 common-rail용 인젝터를 선택하였다. Fig. 2는 이 인젝터의 작동원리를 도시한 그림이다.

솔레노이드가 OFF 상태인 경우 솔레노이드 밸브의 스프링에 의해 아마추어(armature)가 출구 오리피스를 차단하게 되며, 이에 따라 압력 제어실(pressure control chamber)의 압력은 레일 압

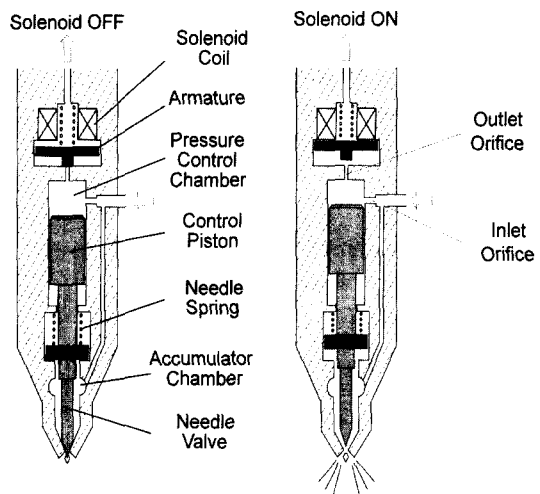


Fig. 2 Operation of common-rail injector

력과 같은 상태가 된다. 이 압력은 제어피스톤의 상부에 작용하며, 니들 스프링과 함께 분사 노즐을 차단하는 방향으로 작용하게 되어 분사는 일어나지 않는다. 인젝터 구동장치에 의해 솔레노이드가 ON 상태가 되면, 솔레노이드의 전자기력에 의해 출구 오리피스가 열리게 되며, 이 순간 압력제어실의 압력은 입·출구 오리피스의 유량비에 따라 결정되는 압력으로 떨어지게 되고, 축압실(accumulator chamber)과 제어실의 압력차에 의해 니들밸브가 열리면서 분사가 개시된다.

### 3. 인젝터 동적 모델링

#### 3.1 인젝터 모델(Injector Model)

Common-rail 연료분사 시스템에서 연료 분사 과정의 동역학은 매우 복잡하나, 인젝터 자체에만 한정하여 다음의 가정 하에 인젝터의 모델을 유도하였다.

1) Common-rail 연료분사 시스템에서 레일 압력은 전자제어 시스템에 의해 폐루프 제어가 수행되기 때문에 공급압력의 맥동현상은 무시할 수 있다.

- 2) 축압실의 압력은 공급압력과 같다.
- 3) 리턴 압력은 대기압과 같다.
- 4) 제어실 내의 연료는 압축성이다.

인젝터의 동적 모델은 솔레노이드 양단의 전압( $V$ )을 입력으로 하고, 솔레노이드 구동전류( $i$ )를 출력으로 하는 단일 입·출력 시스템으로 모델링하였으며, 7개의 상태변수를 갖는 7차 1계 비선형 미분방정식으로 표현할 수 있다.

#### 3.1.1 솔레노이드(Solenoid)

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

$$v = iR + \frac{d\lambda}{dt} \tag{1}$$

$\lambda$ 는 코일의 구동전류( $i$ )와 아마추어 변위( $x_a$ )의 함수로 표현되며, 실험에 의해 구할 수 있다.  $\lambda$ 의 미분을 포함한 형태로 식(1)을 다시 쓰면 식

(2)와 같이 표현된다.

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

전류의 미분방정식은 식(3)과 같다.

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

#### 3.1.2 아마추어(Armature)

아마추어에는 솔레노이드에 의한 자기력과 스프링력 및 압력차에 의한 힘이 주로 작용한다. 아마추어의 거동에 대한 지배방정식은 식(4)와 같다.

$$m_a \ddot{x}_a = A_a \Delta P_i + F_{mag} - m_a g \cos \theta - F_{sd} - F_{sa} - b_a \dot{x}_a \tag{4}$$

솔레노이드 흡인력은 식(5)에 의해 구할 수 있다.

$$F_{mag} = \frac{\partial \lambda(i, x_a)}{\partial x_a} \cdot i = E(i, x_a) \cdot i \tag{5}$$

식(5)로부터  $E(i, x_a)$ 는  $F_{mag}/i$ 로 구해질 수 있다. 솔레노이드 실험장치를 이용하여 일정 전류상태에서 구동전류와 아마추어 변위에 따른 솔레노이드의 흡인력(Magnetic Force) 측정실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 측정된 흡인력을 이용하여  $E(i, x_a)$ 를 3차원 look-up table의 형태로 모델에 포함시켰다.

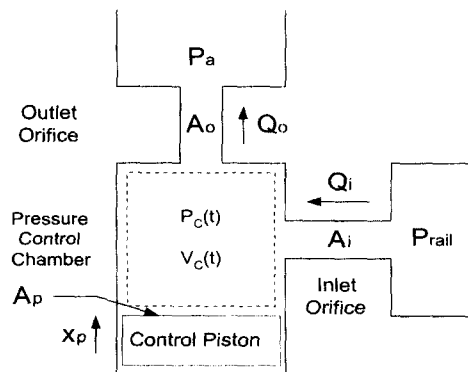


Fig. 3 Pressure control chamber model

### 3.1.3 압력제어실

Fig. 3과 같이 단순화된 제어실의 모델에 연속 방정식을 적용하면, 식(6)과 같이 압력제어실의 압력에 대한 미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_c &= \frac{\beta_f}{V_c} (Q_i - Q_o - \dot{V}_c) \\ &= \frac{\beta_f}{V_{c0} - A_p x_p} (Q_i - Q_o + A_p \dot{x}_p) \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.1.4 아마추어 챔버

아마추어 챔버의 압력도 압력제어실과 같은 방법으로 인젝터 구동모델에 포함시켰으며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_a &= \frac{\beta_{fa}}{V_a} (Q_{ia} - Q_{oa} + \dot{V}_a) \\ &= \frac{\beta_{fa}}{V_{a0} + A_a x_a} (Q_{ia} - Q_{oa} - A_a \dot{x}_a) \end{aligned} \quad (7)$$

### 3.1.5 제어피스톤과 니들밸브

제어피스톤과 니들밸브의 거동은 아래의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} (m_p + m_n) \ddot{x}_p &= -k_p(x_{pf} - x_{p0}) - k_p x_p \\ &\quad - A_p P_c + P_{rail}(A_n - A_s) \\ &\quad - (m_p + m_n)g \cos \theta - b_p \dot{x}_p \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.2 인젝터 모델 검증

인젝터 동적 모델을 검증하기 위하여 인젝터 구동기간 및 레일압력에 따른 구동전류 및 니들 변위를 측정하는 기초실험을 수행하였으며, 기초실험에서 측정된 솔레노이드 양단의 전압을 입력으로 하여 모델을 시뮬레이션하였다. 입력으로부터 7개의 상태변수들이 순환형으로 계산된다.

Fig. 4, 5는 인젝터 구동기간 및 레일압력에 따른 모델 검증결과를 보여주고 있다. 니들 변위의 경우 이 연구에서 구현된 모델을 이용한 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 인젝터 구동전류는 peak영역에서 약간의

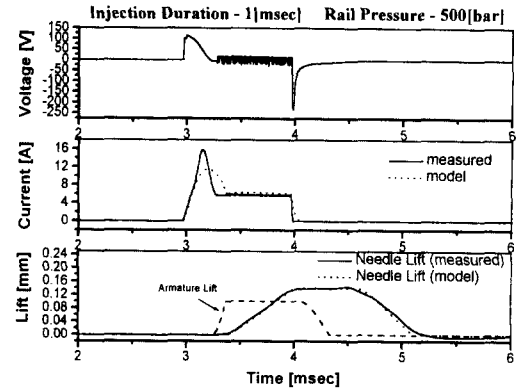


Fig. 4 Validation of common-rail injector model I

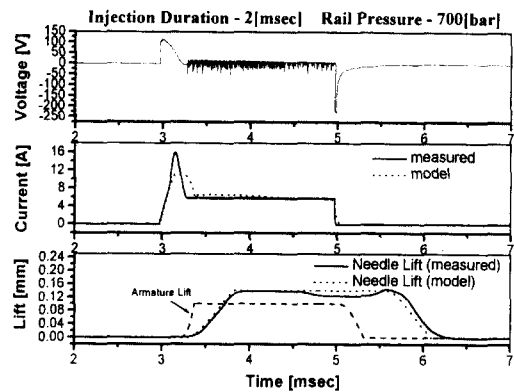


Fig. 5 Validation of common-rail injector model II

오차를 보이고 있으나, peak and hold 구동방식의 특징을 잘 나타내고 있다. 측정된 니들 변위에는 실제 연료분사시에 발생하는 공급압력의 변동에 의한 압력제어실 및 축압실의 맥동현상의 영향이 나타나고 있으나, 압력제어실과 축압실의 맥동은 니들 변위에 큰 영향을 미치지 않으므로 무시할 수 있다. 이 모델에서는 공급압력의 맥동현상을 무시하였으므로 측정된 니들 변위에서 보여지는 공급압력의 변동에 의한 영향은 나타나지 않고 있다.

## 4. 니들 변위 추정기 설계

### 4.1 아마추어 모델

니들 변위를 추정하기 위하여 먼저 아마추어

변위 관측기를 설계하였다. 아마추어 변위 관측기 설계에는 앞에서 제안한 7개의 상태변수를 갖는 인젝터 모델에서 아마추어의 거동까지만 고려한 3개의 상태변수를 갖는 아마추어 모델을 사용하였다. 이 모델에서 고려된 3개의 상태변수는 전류, 아마추어 변위, 아마추어 속도이며, 입력과 출력은 3장의 인젝터 모델과 같다. 또한 아마추어 속도의 경우, 압력에 의한 영향을 무시하였다. 식(9)는 아마추어 변위 관측기 설계에 사용된 아마추어 모델의 상태방정식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned}$$

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{-Rx_1 - E(x_1, x_2)x_3 + u}{L(x_1, x_2)} \\ x_3 \\ \frac{E(x_1, x_2)x_1 - k_a(x_{af} - x_{a0} + x_2) - b_a x_3}{m_a} \end{bmatrix}$$

$$h(x, u) = x_1 \quad (9)$$

## 4.2 아마추어 변위 관측기

### 4.2.1 가관측성(Observability)

관측기를 모델에 적용하기에 앞서 아마추어 모델의 관측가능 여부에 대하여 판별하였다.

가관측성 판별을 위해 아마추어 모델에서  $L(x_1, x_2)$ 와  $E(x_1, x_2)$ 를 상수로 가정한 선형 모델(식(10))을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B'u'(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{E}{L} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{E}{m_a} & -\frac{k_a}{m_a} & -\frac{b_a}{m_a} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0]$$

주어진 모델에 대하여 가관측성 행렬(Observability Matrix)은 다음과 같고,

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{E}{L} \\ \frac{R^2}{L^2} - \frac{E^2}{Lm_a} & \frac{Ek_a}{Lm_a} & \frac{RE}{L^2} + \frac{Eb_a}{Lm_a} \end{bmatrix}$$

인젝터 구동시에는  $\text{rank}(O) = 3$ 이므로 관측가능하다.

### 4.2.2 관측기 게인의 설정

식(9)의 형태로 표현되는 아마추어 모델에 대한 아마추어 변위 관측기로 식(11)과 같은 형태의 슬라이딩 관측기<sup>3)</sup>를 사용하였다.

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + H[y - \hat{y}] + K[\text{sign}(y - \hat{y})] \quad (11)$$

식(11)의 슬라이딩 관측기는 일반적인 루엔버거 관측기에 스위칭 항을 추가한 형태이다. 관측기 게인  $H$ 와  $K$ 는 다음과 같이 결정한다.

#### 1) 루엔버거 관측기 게인 $H$ 의 설정

동적 시스템의 상태방정식이 식(12)와 같이 주어진 경우

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (12)$$

매 순간마다 입력  $u(t)$ 와 출력  $y(t)$ 만이 측정 가능하다면, 상태변수  $x(t)$ 의 추정치인  $\hat{x}(t)$ 는 식(13)과 같은 형태의 루엔버거 관측기에 의해 구할 수 있다.<sup>4)</sup>

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

상태변수 추정오차를  $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 라 정의하면, 관측기의 오차동역학은 식(14)와 같다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A - HC)\tilde{x}(t) \quad (14)$$

만일  $(C, A)$ 가 관측가능하면,  $A - HC$ 가 안정하도록 관측기 게인,  $H$ 를 선정할 수 있다.

일반적인 루엔버거 관측기는 임의로 적절한 계인을 설계자가 결정하는 방식이다.  $A - HC$ 를 안정하게 하고, 원하는 성능이 나올 수 있도록

A-HC의 극점들을 배치하는 방법을 통하여 H를 설정한다.

아마추어 변위 관측기의 경우 A-HC는 식(15)와 같이 되며,

$$A-HC = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} - h_1 & 0 & -\frac{E}{L} \\ -h_2 & 0 & 1 \\ \frac{E}{m_a} - h_3 & -\frac{k_a}{m_a} & -\frac{b_a}{m_a} \end{bmatrix} \quad (15)$$

A-HC의 극점을  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 라 하면, H는 식(16)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} h_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \frac{R}{L} + \frac{b_a}{m_a}) \\ h_2 &= -\frac{L}{E} [h_1 + \frac{R}{L} + \frac{m_a}{k_a} (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3)] \\ h_3 &= \frac{L}{E} [(h_1 + \frac{R}{L}) \frac{b_a}{m_a} + \frac{k_a}{m_a} + \frac{E}{L} \cdot \frac{E}{m_a} \\ &\quad - (\lambda_1 \cdot \lambda_2 + \lambda_2 \cdot \lambda_3 + \lambda_3 \cdot \lambda_1)] \end{aligned} \quad (16)$$

## 2) 슬라이딩 계인 K의 설정

식(11)과 같은 형태의 관측기의 오차동역학은 식(17)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \Delta f_1 - h_1(x_1 - \hat{x}_1) - k_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \Delta f_2 - h_2(x_1 - \hat{x}_1) - k_2 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \Delta f_3 - h_3(x_1 - \hat{x}_1) - k_3 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (17)$$

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

슬라이딩 함수, s를 측정된 전류와 추정된 전류의 차이로 정의하면, s와 s의 미분은 식(18)의 형태가 되며,  $\dot{x}$ 에 대한 슬라이딩 조건은 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned} s &= x_1 - \hat{x}_1 = \tilde{y} \\ \dot{s} &= \dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1 = \Delta f_1 - h_1 \tilde{y} - k_1 \text{sign}(\tilde{y}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} (\frac{1}{2} s^2) = s \dot{s} = \tilde{y} (\Delta f_1 - h_1 \tilde{y} - k_1 \text{sign}(\tilde{y})) < 0 \quad (19)$$

슬라이딩 조건을 만족시키기 위한  $k_1$ 은 다음과 같이 선택할 수 있다.<sup>5,7)</sup>

$$k_1 > |\Delta f_1| + |h_1 \tilde{y}| \quad (20)$$

$$\text{여기서 } \Delta f_1 = \frac{-R \tilde{x}_1 - E \tilde{x}_3}{L}$$

sliding시  $s = \dot{s} = 0$  이므로,  $\text{sign}(\tilde{y}) = \frac{\Delta f_1}{k_1}$ 이 된다. 이를 식(17)에 대입하여  $x_3$ 에 대한 오차동역학을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}}_3 - \frac{k_3}{k_1} \frac{E}{L} \tilde{x}_3 = \Delta f_3 + \frac{k_3}{k_1} \frac{R}{L} \tilde{x}_1 \quad (21)$$

식(21)의 오차동역학이 안정하도록  $k_3$ 를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\lambda_{x_3} = \frac{k_3}{k_1} \frac{E}{L} < 0, \quad k_3 < 0 \quad (22)$$

$\Delta f_3 = \frac{E \tilde{x}_1 - k_a \tilde{x}_2 - b_a \tilde{x}_3}{m_a}$  이므로, 식(21)으로부터  $x_1$ 과  $x_3$ 가 수렴할 경우,  $x_2$ 도 수렴하게 되어  $k_2 = 0$ 으로 설정하였다.

## 4.3 니들 변위 추정기 시뮬레이션

니들 변위는 인젝터 모델을 이용하여 관측기에 의해 추정된 전류와 아마추어 변위로부터 추정된다. 니들 변위 추정기의 성능을 실험에 앞서 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 슬라이딩 관측기의 모델링 오차에 대한 강인성(robustness)을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 모델링 오차가 존재하는 경우의 추정결과를 Fig. 6에 도시하였다. 아마추어 변위 관측기 내의 구동전류 추정값과 인젝터 구동전류와의 오차를 이용하여 다른 상태변수들을 추정함으로써 모델링 오차와 무관하게 아마추어 변위와 니들 변위가 효과적으로 추정됨을 알 수 있다.

## 5. 실험 결과

니들 변위 추정기의 성능 확인 실험은 인젝터 모델 검증에 위한 기초실험과 같은 조건에서 실시되었으며, 다양한 운전조건을 재현하기 위하여 레일 압력과 인젝터 구동기간을 변화시키면서 실험하였다. 추가로 파일럿 분사가 포함된 경

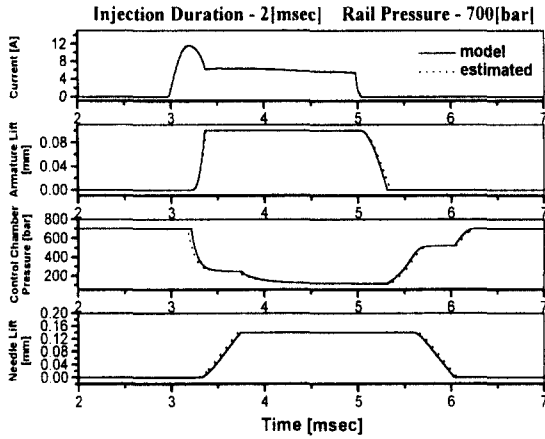


Fig. 6 Estimation results of needle lift estimator with modeling error : simulation

우의 니들 변위 추정 실험을 실시하였다.

1) 레일 압력변화에 대한 니들 변위 추정

Fig. 7, 8은 레일 압력에 따른 니들 변위 추정 결과이다. 실험 결과는 니들 변위가 효과적으로 잘 추정되고 있음을 보여준다. 실험은 인젝터 구동 기간을 2msec로 고정한 상태에서 레일 압력을 변화시키면서 진행되었다.

2) 인젝터 구동기간변화에 대한 니들 변위 추정

Fig. 9와 10은 인젝터 구동기간에 따른 니들 변위 추정 실험결과를 보여주고 있다. 레일 압력이

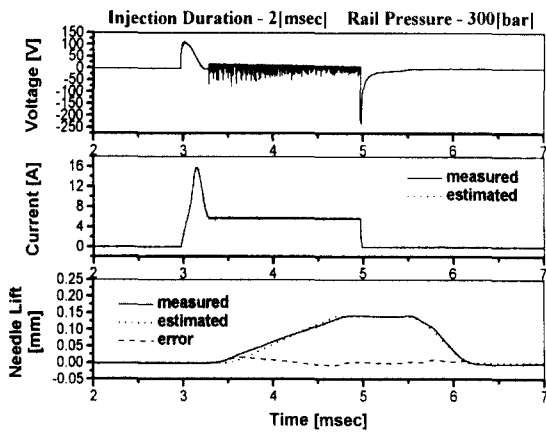


Fig. 7 Estimation results with various rail pressure I

500bar인 경우의 결과 그래프이며, 추정결과가 측정값과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

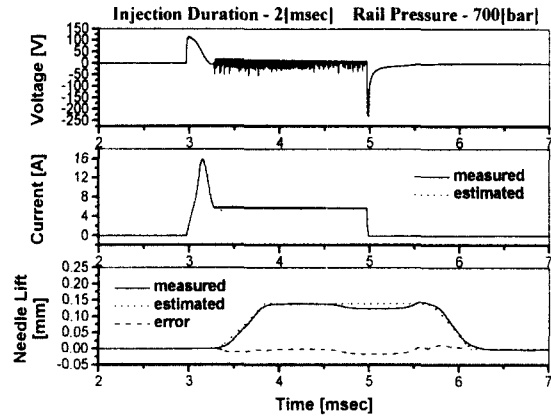


Fig. 8 Estimation results with various rail pressure II

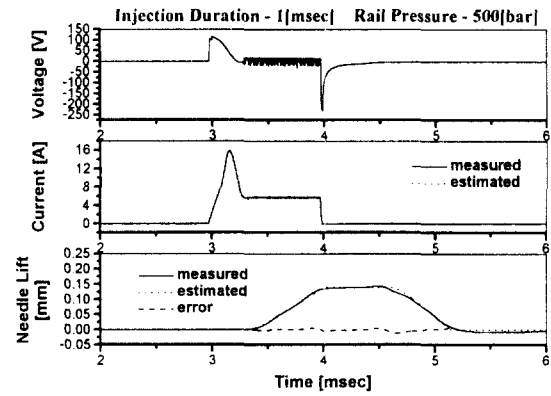


Fig. 9 Estimation results with various injection duration I

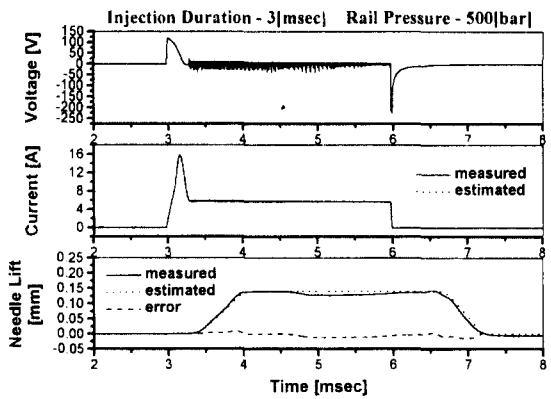


Fig. 10 Estimation results with various injection duration II

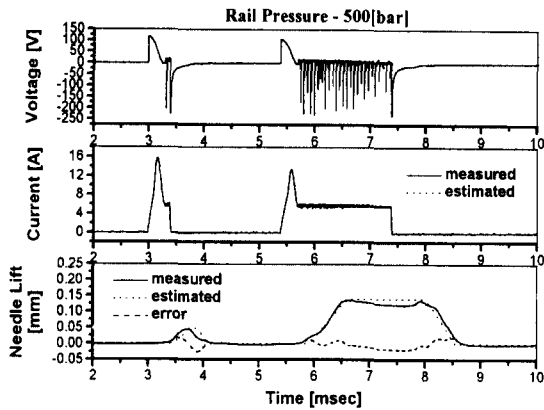


Fig. 11 Estimation results (Pilot injection)

### 3) 파일럿 분사시 니들 변위 추정 실험

Fig. 11은 파일럿 분사가 포함된 경우의 니들 변위 추정 결과를 보여주고 있다. 파일럿 분사시 공급압력의 맥동의 증가로 다소 오차가 증가하나, 이 경우에도 니들 변위가 효과적으로 추정됨을 알 수 있다.

## 6. 결론

이 연구에서는 common-rail 분사 시스템에서 연료분사량의 폐루프 제어를 위한 기초연구로서, 인젝터의 동적 모델링을 통하여 슬라이딩 관측기를 이용한 니들밸브의 변위를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 단일 입·출력을 갖는 7차 1계 비선형 미분 방정식으로 표현되는 common-rail 인젝터의 수학적 모델을 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.
- 2) 인젝터의 동적 모델을 기반으로 상태변수인 아마추어 변위를 추정하는 관측기를 설계하였으며, 아마추어 변위 관측기를 이용하여 니들 변위를 추정하는 알고리즘을 제시하였다.
- 3) 관측기 설계에 있어서 비선형 슬라이딩 관측기(Sliding observer)를 적용하여 모델링 오차에 대해서도 강인한 니들 변위 추정기를 설계하

였다.

4) 시뮬레이션과 실험을 통하여 니들 변위 추정 알고리즘을 검증함으로써 연료분사량 및 분사시기에 대한 무센서(sensorless) 폐루프 제어에 대한 가능성을 입증하였다.

## 후 기

이 연구는 “G7 차세대 자동차 기술” 과제의 일부로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) W. Bochner, K. Hummel, “Common-rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles,” SAE 970345, 1997.
- 2) G. Stump, M. Ricco, “Common-rail an Attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines,” SAE 960870, 1996.
- 3) J. E. Slotine, et. al., “On Sliding Observer for Nonlinear Systems,” Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.109, 1987.
- 4) K. S. Narendra, A. M. Anaswamy, Stable Adaptive Systems, Prentice Hall, 1989.
- 5) 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, pp. 344-352, 1989.
- 6) M. Kao, J. J. Moskwa, “Engine Load and Equivalence Ratio Estimation for Control and Diagnostics via Nonlinear Sliding Observers,” Int. J. of Vehicle Design, Vol.15, pp.358-368, 1994.
- 7) R. A. Masmoudi, J. K. Hedrick, “Estimation of Vehicle Shaft Torque Using Nonlinear Observers,” Trans. ASME. Vol. 114, pp.394-400, 1992.
- 8) 선우명호, 윤팔주, 박승범, 성경훈, “HSDI Common-rail 분사계 모델링 및 분사율 예측에 관한 연구,” 제8회 G7 차세대자동차기술논문집, pp.14-19, 2000.