

## 차량 요레이트 피드백을 통한 가상 제동 압력 센서 개발

유 승 한<sup>\*†</sup>

\* 한국기술교육대 기계공학부

### Virtual Brake Pressure Sensor Using Vehicle Yaw Rate Feedback

Seung-Han You<sup>\*†</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received July 14, 2015 ; Revised November 18, 2015 ; Accepted November 18, 2015)

**Key Words:** Yaw Moment Control(요모멘트제어), Virtual Sensor(가상센서), Empirical Modeling(경험적모델링), Optimal Observer(최적관측기), Robust Observer(견실관측기), Adaptive Observer(적응관측기)

**초록:** 본 연구에서는 좌/우 편제동을 통해 차량의 요 모션을 제어하는 제동 기반 요모멘트 제어 시스템에서의 가상 제동 압력 센서를 개발하였다. 제동 압력을 추정하기 위해 유압시스템을 경험적 방법으로 모델링하였고 이를 기반으로 요레이트 피드백 제동 압력 관측기를 설계하였다. 차량 요레이트 동역학에 존재하는 외란의 영향을 최소화 하기 위해 외란 적응 기법, 외란 축소 기법 및 최적 이득 기법을 관측기 설계에 적용하였고 그 방법들 간의 성능 비교 및 검증은 HILS 를 통해 수행하였다. 그 결과 외란 축소 방식의 견실 관측기의 압력 추정 성능이 일반적인 Luenberger 관측기 대비 가장 우수하였으며 그 원인에 대해 분석하였다.

**Abstract:** This paper presents observer-based virtual sensors for YMC(Yaw Moment Control) systems by differential braking. A high-fidelity empirical model of the hydraulic unit in YMC system was developed for a model-based observer design. Optimal, adaptive, and robust observers were then developed and their estimation accuracy and robustness against model uncertainty were investigated via HILS tests. The HILS results indicate that the proposed disturbance attenuation approach indeed exhibits more satisfactory pressure estimation performance than the other approach with admissible degradation against the predefined model disturbance.

- 기호설명 -

$m, I_z$  : 차량 질량, 차량 요방향 회전관성  
 $v_x$  : 차량 종방향 속도  
 $F_f, F_r$  : 앞 바퀴, 뒤 바퀴 횡력  
 $l_f, l_r$  : 무게 중심에서 앞/뒤 바퀴까지의 거리  
 $\alpha$  : 타이어 횡 슬립각  
 $\delta_f$  : 차량 앞 바퀴 조향각  
 $c_f, c_r$  : 전/후 타이어 코너링 강성  
 $T$  : 좌/우 타이어 간의 거리 (wheel tread)

$K_{DB}$  : 브레이크 게인(압력에서 제동토크)  
 $P_{DB}$  : 좌우 편제동압(differential braking pressure)  
 $\beta, r \equiv \dot{\psi}$  : 차체 횡슬립각, 요레이트  
 $a_y$  : 차량 횡가속도  
 $w$  : 요 방향 외란  
 $\hat{x}$  : x 의 추정치  
 $\tilde{x}$  : x 의 추정 오차 (=  $x - \hat{x}$ )

#### 1. 서 론

최근 자동차 업계는 안전 기술 측면에서는 차량 사고 피해를 최소화 하고자 하는 수동적 안전 개념에서 벗어나, 사고 자체를 회피하고자 하는 능동적 안전 개념으로 진화하고 있으며, 동시에 최

† Corresponding Author, [shyoo@koreatech.ac.kr](mailto:shyoo@koreatech.ac.kr)  
 © 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

고의 동역학적 성능을 발휘하는 고성능 차량에 대한 소비자들의 지속적 요구에 직면해 있다. 이와 관련하여 자동차 업계에서는 차량의 제동 압력을 능동적으로 제어하여 차량의 요 안정성<sup>(1,2)</sup>을 유지시키고, 주행 중 의도하지 않은 차선 이탈을 방지하고,<sup>(3)</sup> 운전자의 전방 충돌 회피 조작을 보조<sup>(4)</sup>하거나, 차량의 선회한계를 증대<sup>(5)</sup>시키는 다양한 기능들을 개발하고 있다. 이와 같이 차량 요레이트 제어 관점에서 현 시점에서 가장 널리 사용되며 신뢰성을 보장하는 사시 제어 시스템은 제동 시스템이다.

최근에는 정밀한 제동 압력 제어를 위해 압력 센서를 장착하는 경우도 많아 지고 있지만 아직 대부분의 차량에서는 압력 센서는 장착되어 있지 않다. 따라서 좌/우 편제동을 활용한 요 제어 시스템에서 정밀한 압력제어 및 제동력 예측 등을 위해 가상 압력 센서의 개발이 요구되며, 압력 센서가 장착된 시스템의 경우에도 시스템의 고장 진단 로직<sup>(6)</sup> 개발을 위해서는 압력의 해석적 중복 역할을 하는 가상 압력 센서가 필요하다. 관련 기존 연구에서는 주로 제동 압력 제어를 위해 실제 압력 센서를 적용하거나,<sup>(7)</sup> open-loop 유압 모델<sup>(8)</sup>을 사용하여 가격 및 모델의 신뢰성 측면에서 불리한 측면이 존재하지만, 본 논문에서 제안하는 가상 압력 센서는 차량의 요레이트 피드백과 경험적 모델링 방법론으로 도출된 유압 모델의 융합을 통해 보다 정밀한 압력의 추정이 가능하며 특히 차량의 요레이트 동역학에 존재하는 일정량의 외란에 대해서도 추정 성능의 견실성을 확보하는 것을 특징으로 한다.

한편, 본 연구에서는 좌/우 편제동을 이용한 차량 요 모멘트 제어 시스템에 대해 경험적 모델링을 통해 제동 유압시스템을 모델링하였고, 이를 기반으로 세 가지의 상태 관측기 설계 방법론을 적용하여 요레이트 피드백 방식의 압력 추정 관측기들을 설계하였다. 가상 압력 센서, 다시 말해 압력 추정기를 설계하기 위한 방법론은 최적 관측기(optimal observer),<sup>(9)</sup> 견실관측기(robust observer),<sup>(10,11)</sup> 적응 관측기(adaptive observer)<sup>(12)</sup> 설계 방법론을 적용하였고 그 성능을 일반적인 Luenberger 관측기와 비교하였다. 한편 최적 관측기는 기 정의된 제한된 불확실성에 대해 추정 오차를 최소화하는 최적 계인을 적용한 축소 차수 형태의 관측기이고, 견실 관측기는 외란의 영향을 제거하면서 압력을 추정하는 관측기의 형태이고, 마지막으로 적응 관측기는 외란을 실시간 추정 업데이트 하면서 압력

을 관측하는 방식이다.

본 논문에서 개발된 유압시스템 모델, 세 가지 방법론에 의한 요레이트 피드백 방식의 가상 압력 센서들과 차량 모델은 Matlab/Simulink 를 통해 모델링 되었고 dSPACE 社의 범용 ECU 를 통해 실제 유압 액츄에이터 HW 와 연계되어 HILS 시스템을 구축하였고 이를 이용하여 다양한 테스트 시나리오 상황에서 제안된 가상 압력 센서들의 추정 성능을 정량적으로 검증하고 비교하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 차량 요레이트 동역학 모델링

본 논문에는 Fig. 1 과 같이 그 구조의 단순함에 비해 비교적 정확성이 뛰어나다고 알려져 있는 2 자유도 single track 모델<sup>(1)</sup>을 사용하여 차량 요레이트 동역학 모델을 수립하였다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{m v_x} & -1 + \frac{C_r l_r - C_f l_f}{m v_x^2} \\ \frac{C_r l_r - C_f l_f}{I_z} & \frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_f}{m v_x} \\ \frac{C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{TK_{DB} P_{DB}}{2I_z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에 표현된 2 자유도 Single track 모델은 좌우 타이어를 하나로 결합하여 단일화된 전/후의 타이어 선형 횡력 모델을 바탕으로 차량 횡방향 힘 평형식, 요방향 모멘트 평형식을 적용하여 얻어진 모델이다. 운전자의 조향각( $\delta_f$ ) 입력 및 편제동 입력( $P_{DB}$ )에 의해 차량의 2 개의 횡방향 거동, 즉 차체 횡슬립각( $\beta$ )와 요레이트( $r$ )가 계산된다.

식 (1)에서 요 방향 운동 방정식만 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= -\frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z v_x} r + \frac{C_r l_r - C_f l_f}{I_z} \beta + \frac{C_f l_f}{I_z} \delta_f + \frac{T}{2I_z} K_{DB} P_{DB} \\ &= \sigma_1 r + \sigma_2 \beta + \sigma_3 \delta_f + \sigma_4 P_{DB} \\ &= \bar{\sigma}_1 r + \bar{\sigma}_2 \beta + \bar{\sigma}_3 \delta_f + \bar{\sigma}_4 P_{DB} + \\ &\quad + ((\bar{\sigma}_1 - \sigma_1)r + (\bar{\sigma}_2 - \sigma_2)\beta + (\bar{\sigma}_3 - \sigma_3)\delta_f + (\bar{\sigma}_4 - \sigma_4)P_{DB}) \\ &= \bar{\sigma}_1 r + \bar{\sigma}_2 \beta + \bar{\sigma}_3 \delta_f + \bar{\sigma}_4 P_{DB} + w' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_n$  은 실제 계수이고  $\bar{\sigma}_n$  는 nominal 계수이다.  $w'$  는 파라미터 오차에 기반한 요레이트 동역학에서의 외란을 의미한다. 식 (2)에서 조향각( $\delta_f$ )과 편제동 ( $P_{DB}$ )은 센서에 의해 계측되거나

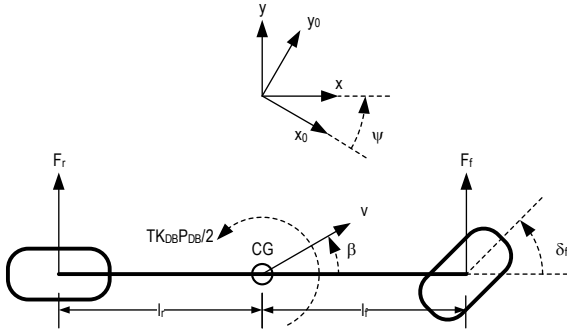


Fig. 1 2DOF single track model

제동 유압 모델을 통해 알 수 있는 입력 변수이지만 횡슬립각( $\beta$ )는 일반적으로 정확한 값을 추정하기 어렵다고 알려져 있다. 따라서 식 (3)과 같은 횡가속도 센서 계측 값( $a_y$ )을 이용하여  $\dot{\beta}$ 를 소거하고 식 (1)의 두 식에서  $\beta$ 를 소거하면 아래 식 (4)와 같이  $\beta$  대신에  $a_y$ 를 입력받는 요레이트 동역학 모델을 얻을 수 있다.

$$a_y = v_x(\dot{\beta} + r) \quad (3)$$

$$\dot{r} = \bar{\sigma}_1 r + \bar{\sigma}_2 a_y + \bar{\sigma}_3 \delta_f + \bar{\sigma}_4 P_{DB} + w \quad (4)$$

다음 장에서는 요레이트 동역학의 입력으로 작용하는 제동 압력  $P_{DB}$ 를 결정하는 제동 유압시스템 모델에 대해 다룬다.

2.2 유압 시스템 모델링

Fig. 2는 본 논문에서 고려된 제동 유압 액추에이터 시스템을 나타낸다. 상세한 제동 시스템의 경험적 모델링 과정 및 결과는 기존 발표 참고 문헌 (11)을 참조바라며 여기서는 본 논문에서 필수적인 부분만을 설명하도록 하겠다.

NC(Normally Closed)타입의 솔레노이드 밸브 SOL1과 NO(Normally Open)타입의 솔레노이드 밸브 SOL2는 각각 제동압을 형성하는 브레이크 챔버의 증압과 감압을 조절한다. 보다 상세히 설명하면 SOL1은 유압 펌프로부터 브레이크 챔버까지의 오일의 흐름을 조절하며 SOL2는 브레이크 챔버에서 리저버로의 오일 흐름을 조절한다. 펌프 압력과 리저버 압력을 고정 값으로 하고 특정 제동 압력에서의 SOL1과 SOL2에 의해 제어되는 정상상태 압력 변화를 반복 실험을 통해 loop-up 테이블 형태로 구하고 실제 압력 변동은 이 정상상태 값이 선형적인 동역학을 거쳐 발생한다고 가정하고 다음 식 (5)와 같은 모델을 결정하였다.

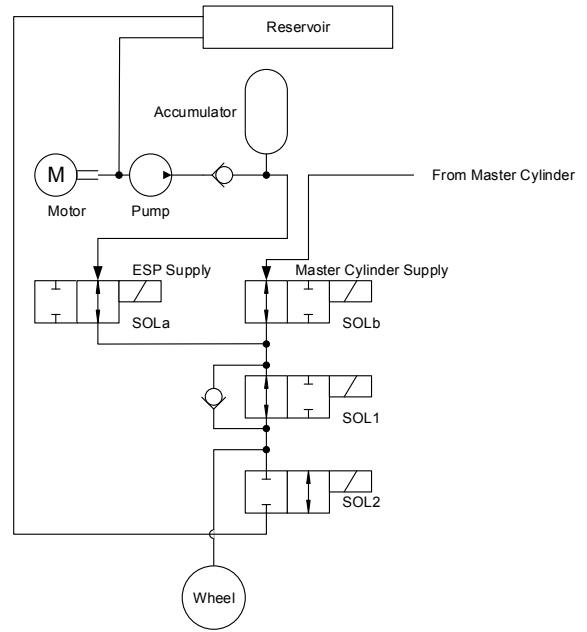


Fig. 2 Differential brake hydraulic actuation system

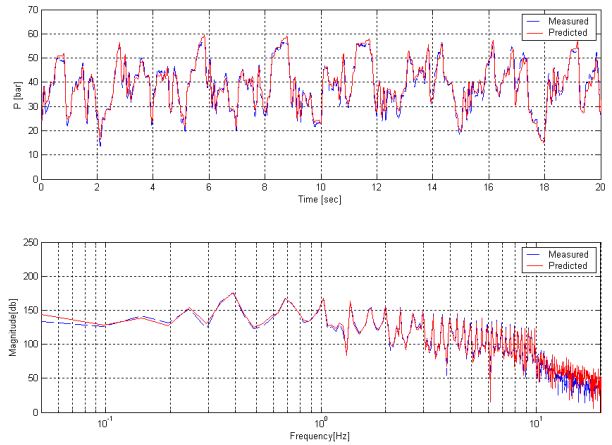


Fig. 3 Time & Frequency domain model validation results

$$p(z) = G_A(z) \{ \Delta p_{ss}^1(u_1, p) + \Delta p_{ss}^2(u_2, p) \} = \frac{1}{z-1} \cdot \frac{-0.598z + 1.137}{z - 0.592} \{ \Delta p_{ss}^1(u_1, p) + \Delta p_{ss}^2(u_2, p) \} \quad (5)$$

$\Delta p_{ss}^1$ 은 PWM 듀티  $u_1$ 이 입력되는 SOL1에 의해 생성되는 정상상태 압력 증가량이고  $\Delta p_{ss}^2$ 는 PWM 듀티  $u_2$ 가 입력되는 SOL2에 의해 발생하는 정상상태 압력 감소량이다.  $G_A(z)$ 은 정상상태 압력 변동이 실제 과도응답으로 구현되는 특성을 실험적으로 얻은 선형 동역학 모델이고 이 모델의 계수는 최소자승법을 통해 결정하였다.<sup>(13)</sup>

Fig. 3 은 식 (5)로 표현되는 유압 시스템 모델의 시간 영역과 주파수 영역에서의 검증 결과 이다. 이를 살펴보면 수립된 유압 시스템의 수학적 모델은 그 구조적 단순함에 비하여 정확도가 뛰어난을 확인 할 수 있고 가상 압력 센서의 베이스 모델 역할에 적합하다 판단할 수 있다.

### 3. 가상 제동 압력 센서 설계

2 장에서 수립된 제동 유압 시스템 모델, 차량 요레이트 모델을 기본 모델로 하여 요레이트 피드백을 통한 가상 압력 센서를 설계하였다. 가상 압력 센서는 세 가지의 관측기 설계 방법론을 적용하여 구현 하였으며 설계 방법론은 외란에 대한 대처 방안에 따라 최적 관측기, 견실 관측기, 적응 관측기로 구별된다.

관측기 설계를 위해 식 (4)와 식 (5)를 결합하여 식 (6)과 같이 총 3 차의 기본 상태 방정식(1 차 요레이트 모델+2 차 유압시스템 모델)을 구성하였다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} r \\ P_{DB} \\ \dot{P}_{DB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}'_1 & \bar{\sigma}'_4 & 0 \\ 0 & a_1 & 1 \\ 0 & a_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ P_{DB} \\ \dot{P}_{DB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \bar{\sigma}'_2 a_y + \bar{\sigma}'_3 \delta_f + w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= Ax + Bu + \delta(a_y, \delta_f, w)$$

여기서  $a_1, a_2, b_1, b_2$  계수는 유압시스템 모델인 식 (5)에서 얻을 수 있고  $u$  는 스칼라로 단일화 된 SOL1, SOL2 의 PMW 듀티 입력이다. ( $-1 \leq u \leq 1$ ).

#### 3.1 최적 관측기

최적 관측기(OO: Optimal Observer)는 기 정의된 제한된 불확실성에 대해 추정 오차를 최소화하는 최적 계인을 적용한 축소 차수 관측기 형태이다.<sup>(9)</sup> 최적 관측기 설계를 위해 식 (6)을 다음 식 (7)과 같이 재구성하였다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} r \\ P_{DB} \\ \dot{P}_{DB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}'_1 & \bar{\sigma}'_4 & 0 \\ 0 & a_1 & 1 \\ 0 & a_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ P_{DB} \\ \dot{P}_{DB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \bar{\sigma}'_2 & \bar{\sigma}'_3 \\ b_1 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ a_y \\ \delta_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= A_o x + B_o u_o + [1 \ 0 \ 0]^T w$$

최적 관측기의 경우 상태 방정식 (7)로 표현되는 시스템에 대하여 출력을 제외한 나머지 상태를 관측하는 축소차수 관측기의 구조를 가진다. 축소 차수 관측기의 구조는 식 (8)로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Fz + Gy + Hu \\ \hat{x} &= My + Nz \end{aligned} \quad (8)$$

where

$$F = A_{22} + LA_{12}$$

$$G = LA_{11} + A_{21} - FL$$

$$H = LB_1 + B_2$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 \\ -L \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix}, A_o = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, B_o = \begin{bmatrix} B_{1,1 \times 3} \\ B_{2,2 \times 3} \end{bmatrix}$$

여기서 관측기 계인  $L$  은 아래의 식 (9)와 같이 관측 오차의 upper bound 인 타원형의 크기  $\Gamma$  를 최소화 시키는 값으로 구한다.<sup>(9)</sup> 타원형의 형태를 나타내는  $\Gamma$  의 크기는 trace 이외에도 최대 특이치(maximum singular value)등 다양한 기준을 적용할 수 있으며 그에 해당하는 관측기의 계인은 간단한 형태의 선형 행렬 부등식을 계산함으로써 구해낼 수 있도록 되어 있다.<sup>(14)</sup>

$$L = \operatorname{argmin}_L (\operatorname{trace}(\Gamma)), \quad \tilde{x}^T \Gamma^{-1} \tilde{x} < 1 \quad (9)$$

#### 3.2 견실 관측기

가상 압력 센서의 설계에 있어서 견실 관측기(RO: Robust Observer)를 적용하는 경우에는 시스템 모델 식 (6)을 아래의 식 (10)과 같이 표현한다. 여기서  $W = [w \ 0 \ 0]^T$  는 요레이트 동역학 상의 외란이며 관측기 추정 성능으로의 영향이 최소화 되어야 한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \delta_r(a_y, \delta_f) + W \quad (10)$$

견실 관측기는 일반적으로 식 (11)과 같이 Luenberger 추정기에 외란 견실성을 위한 비선형 피드백  $\eta(x, u)$  를 추가한 형태로 주어진다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + \delta_r(a_y, \delta_f) + L_r C_r \tilde{x} + \eta(x, u) \quad (11)$$

$$\eta(x, u) = \frac{P_r^{-1} C_r^T C_r \tilde{x}}{\varepsilon} \rho(x, u), \quad \tilde{x} = x - \hat{x}, \quad C_r = [1 \ 0 \ 0]$$

추가적으로 양한정 행렬  $P_r, Q$  과 양의 스칼라 함수  $h(x, u)$  에 대하여 식 (12)의 조건이 만족되어야 하며,<sup>(10,11)</sup> 이 비선형 부등식 조건을 만족하는 해는 선형 행렬 부등식 (13)의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.<sup>(14)</sup>

$$(A - L_r C_r)^T P_r + P_r (A - L_r C_r) = -Q \quad (12a)$$

$$P_r W = C_r^T h(x, u) \quad (12b)$$

$$h(x, u) = p_{r,11} w \quad (12c)$$

$$\rho(x, u) \geq \|h(x, u)\|_{\infty} \quad (12d)$$

$$A^T P_r - C_r^T X_r^T + P_r A - X_r C_r < 0 \quad (13a)$$

$$P_r = \begin{bmatrix} p_{r,11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{r,22} & p_{r,23} \\ 0 & p_{r,23} & p_{r,33} \end{bmatrix} > 0, \quad X_r = P_r L_r \quad (13b)$$

위의 결과를 종합하면 상태 관측 오차  $\tilde{x}$  와  $V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T P \tilde{x}$  으로 정의된 Lyapunov 함수는 다음과 같이  $|C_r \tilde{x}| \geq \varepsilon$  을 만족하는 모든 관측 오차  $\tilde{x}$  에 대해  $\dot{V}(\tilde{x}) \leq -\tilde{x}^T Q \tilde{x}$  를 보장하게 되고, 이 경우 압력을 포함한 상태변수의 추정 오차  $\tilde{x}$  는 요레이트 출력의 추정 오차가  $|C_r \tilde{x}| \leq \varepsilon$  을 만족하도록 제한된다.<sup>(10,11)</sup> 여기서 Q 는 (12a)에서 정의된 것과 같이 양한정 행렬이고  $\varepsilon$  는 출력 관측 오차의 목표 성능을 결정하는 설계 파라미터이다.

### 3.3 적응 관측기

적응 관측기(AO: Adaptive Observer)를 기반으로 한 가상 압력 센서 설계의 경우에는 우선 시스템의 불확실성을 나타내는 파라미터  $\theta$  를 도입하여 식 (6)으로 표현되는 기본 모델을 식 (14)와 같은 형태로 변경한다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x &= Ax + Bu + \delta(a_y, \delta_f, w) = Ax + Bu + \delta_a(a_y, d_f) + W \\ &= Ax + \Phi(u, a_y, \delta_f) + b\theta \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\Phi(u, b, d_f) = Bu + \delta_a(a_y, \delta_f), \quad b = [1 \ 0 \ 0]^T, \theta = w \quad (14b)$$

식 (14)로 표현되는 시스템에서 아래의 식 (15)와 같은 구속 조건들을 만족하는 양한정 행렬 (positive definite matrix)  $P_a$  와 Lipschitz 상수  $\gamma_1$  가 존재하면 식 (16)과 같이 설계된 적응 관측기의 추정 오차  $\tilde{x}$  는 지수적으로 0 으로 수렴한다.<sup>(12)</sup> 수렴성은 Lyapunov 함수를  $V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T P_a \tilde{x} + \rho \tilde{\theta}^T \tilde{\theta}$  로 가정하고 앞서 가정한 것과 같이 식 (15)를 만족하는  $P_a, \gamma_1$  가 존재한다면  $\dot{V}(\tilde{x}) \leq -\beta \tilde{x}^T \tilde{x}$  와 같이 증명이 가능하다.<sup>(12)</sup>

$$\|\Phi - \hat{\Phi}\| \leq \gamma_1 \|x - \hat{x}\| \quad (15a)$$

$$(A - L_a C_a)^T P_a + (A - L_a C_a) P_a + \gamma_1 P_a P_a + \gamma_1 I < -\beta I \quad (15b)$$

$$b^T P_a C_a^\perp = 0 \quad (15c)$$

$$\frac{d}{dt}\hat{x} = A\hat{x} + Bu + \delta_a(\beta, \delta_f) + b\hat{\theta} + L_a C_a \tilde{x} \quad (16a)$$

$$\frac{d}{dt}\hat{\theta} = \frac{1}{\rho} b^T P_a \tilde{x} = \frac{1}{\rho} \tilde{x}_1, \quad C_a = [1 \ 0 \ 0] \quad (16b)$$

비선형 부등식 (15)의 해는 다음과 같은 선형 행렬 부등식의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.<sup>(12,14)</sup>

$$\begin{bmatrix} A^T P_a - C_a^T X_a^T + P_a A - X_a C_a + \gamma_1 I & \gamma_1^{1/2} P_a \\ \gamma_1^{1/2} P_a & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (17a)$$

$$P_a = \begin{bmatrix} p_{a,11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{a,22} & p_{a,23} \\ 0 & p_{a,23} & p_{a,33} \end{bmatrix} > 0, \quad X_a = P_a L_a \quad (17b)$$

적용 관측기의 적응 게인  $\rho$  의 경우 유일한 구속조건은 양수이지만, 해당 적용 관측기의 실제 적용 및 동작에 있어서 과도한 크기의 게인은 파라미터 추정치의 발산 혹은 진동 현상을 발생시키기 때문에 이 점과 수렴 속도 등을 고려하여 적절한 값으로 선정하였다.

## 4. HILS 검증

제안된 가상 압력 센서의 성능을 파악하고 검토하기 위하여 다양한 형태의 압력 파형 시나리오에 대한 실험적 검증을 HILS 환경을 통해 실시하였다. HILS 환경은 국내 대형 차급의 실제 제동 유압 유니트와 압력 센서 계측을 위한 A/D 기능과 슬레노이드 밸브 구동용 PWM 신호 출력 기능을 구비한 dSPACE사의 범용 ECU로 구성되며 제안된 가상 압력 센서 알고리즘은 Matlab/Simulink로 구현되었으며 이를 자동 코드 변환하여 ECU 상에서 10ms 주기로 알고리즘이 수행된다. 상세한 HILS 환경에 대한 설명은 참고문헌 (11)을 참조 바란다.

세 가지 관측기 설계 방법론에 근거하여 개발된 가상센서들의 외란에 대한 견실성을 검증하기 위하여 식 (4)의 차량모델에 약 +20%의 인위적인 파라미터 오차를 주입하여 테스트를 하였다. 한편, 압력 추정 성능 비교 시 성능 기준 역할을 하기 위해 식 (6)을 기반으로 Luenberger 관측기를 설계하였고 이 관측기 극점의 위치를 -100,  $-70.7 \pm 70.7i$  로 설정하였다.

세 가지 가상 압력 센서 간의 추정 성능 비교 검증을 위해 0~15Hz 주파수 성분을 포함하는 결합 사인파 파형(combined sinusoidal)의 편제동 압력이 차량으로 입력 되는 상황을 가정하였고, 이 때 가상 압력 센서의 추정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 0~15Hz의 주파수 영역은 차량 요레이트 동역학 밴드 폭 및 유압 모델의 주파수 응답 특성을 고려하여 설정하였다.

우선 Luenberger 관측기(LO)는 예상한 바와 같이 차량 요레이트 동역학의 외란에 적절한 대응을 못하고 실제 압력과 가장 큰 오차를 나타내었다. 최적 관측기(OO)의 경우 제한된 외란에 대해 가급적 오차를 최소화하는 관점에서 도출된 관측기 개념을 적용하기 때문에 형태는 Luenberger 관측기와 다를 바 없지만 추정 오차는 상대적으로 더 우수한 것을 확인하였다(Fig. 4(a)). 한편 외란에 대응하기 위해, 외란 자체를 추정 보상하는 방식의 적응 관측기(AO)는 외란에 해당하는 파라미터  $\theta = w$ 를 요레이트 오차 피드백을 통해 적절히 업데이트하고 그 것을 내부 모델에서 보상하면서 압력 추정 성능이 이전 두 개의 관측기 타입에 비해

대폭 향상되는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 견실 관측기(RO)는 외란에 대해 그 영향을 적절히 식 (11)의  $\eta$ 를 통해 제거시키는 방식인데 결론적으로 압력 추정 성능이 상대적으로 가장 우수하였다(Fig. 4(b)). 적응 관측기의 경우 실제 유압 시스템 모델에 존재하는 불확실성이 차량모델에 존재하는 불확실성에 비하여 현저히 작다고 가정하고 이를 배제하여 관측기를 설계하였기 때문에 실측한 요레이트와 내부 모델의 요레이트 오차가 모두 요레이트 동역학 외란  $\theta = w$ 로만 간주하여 외란을 업데이트 하기 때문에 견실 관측기에 비해 압력 추정 향에 대한 요레이트 에러에 대한 보상이 작게 되고 따라서 압력 추정 성능이 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

Fig. 5 에 최적 관측기, 적응 관측기, 견실 관측

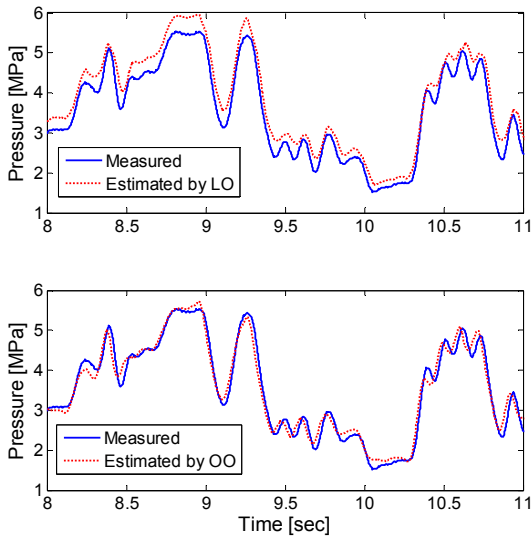


Fig. 4(a) Performance of virtual sensor based on Luenberger observer and optimal observer and

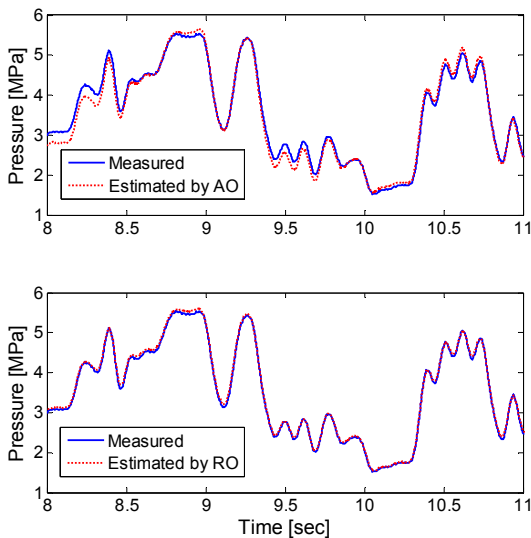


Fig. 4(b) Performance of virtual sensor based on adaptive observer and robust observer

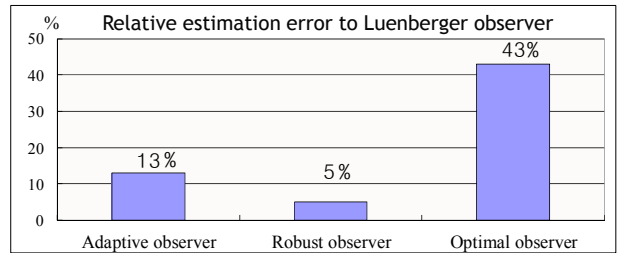


Fig. 5 Relative estimation error to Luenberger observer

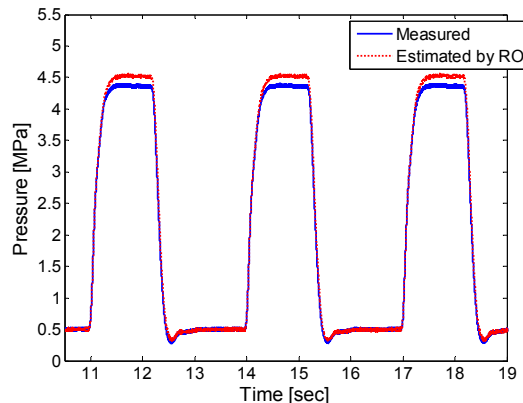
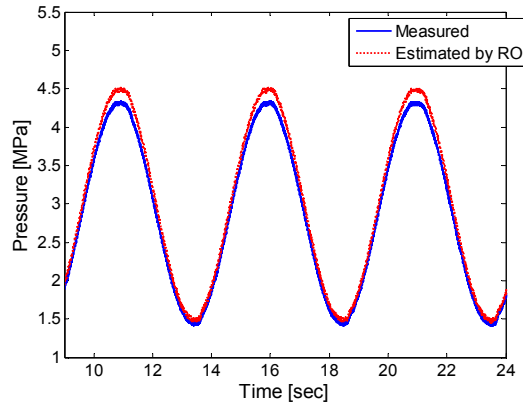


Fig. 6 Pressure estimation error (by RO) to Luenberger observer

기의 압력 추정 오차(Mean Square Error) 수준을 Luenberger 타입 관측기의 추정 오차와 정량적으로 상대 비교하여 나타내었다.

추가적으로 가상 압력 센서의 성능을 보다 실제적인 제어 상황(사인파, 사각파 형태)을 고려하여 추가적으로 검증해 보았다. 그 결과 추정 성능 관련된 경향이 앞 테스트 결과와 유사하여 Fig. 6 에는 견실 관측기 방식의 가상 압력 센서의 추정 결과만을 도시하였다. 그 결과, 고려하지 못한 유압 모델의 오차 등의 이유로 차량 요 모델에서의 + 방향 외란을 완벽하게 제거하진 못하지만 최대 오차 약 3bar 정도로 오차가 제한되며 압력이 비교적 정확하게 추정되는 것을 확인 할 수 있었다.

상기 결과를 종합해 보면 견실 압력 관측기를 적용한 가상 압력 센서의 성능이 가장 우수함을 확인할 수 있었으며 제안된 세 가지 방법의 가상 센서 중 견실 관측기 기반 가상 압력 센서가 차량 요 운동 제어를 위한 제동 압력 제어 시스템의 가상센서로써 가장 적합하다고 판단하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 편제동 기반 차량 요 운동 제어 시스템에서의 가상 압력 센서, 즉 요레이트 피드백을 이용하는 압력 관측기를 개발하였다. 실차 조건에서 필연적으로 발생하는 시스템 외란에 대응 할 수 있는 세 가지 종류의 관측기 설계 방법론(최적 관측기, 견실 관측기, 적응 관측기)를 적용하여 가상 압력 센서를 개발하였고, 그것들 간의 압력 추정 성능을 HILS 를 통해 정량적으로 비교 분석하였다. 그 결과 외란의 영향을 제거하는 방식의 견실 관측기가 외란 자체를 일종의 파라미터로 간주하고 추정하는 적응 관측기 및 제한된 외란에 대해 축소 차수 관측기 형태로 최적의 고정 게인을 적용하는 최적 관측기에 비해 다양한 압력 파형에서 외란을 영향을 가장 효과적으로 최소화하며 결과적으로 압력 추정 성능이 우수함을 확인하였다.

본 연구를 통해 제안된 가상 제동 압력 센서는 차량 요 모델의 정확도가 악화될 우려가 있는 다양한 주행 상황에서 요 외란에 대한 추정 성능의 견실성이 어느 정도 확보되기 때문에 가상 센서에서 추정한 압력의 피드백을 통하여 제동 압력 제어의 정확도를 높이게 되고 결국 제동 압력 제어를 활용하는 다양한 차량 제어 기능들의 성능 향상에 기여할 것으로 예상된다. 또한 압력 센서가 장착된 제동 제어 시스템에서는 제안된 가상 압력

센서가 차량 요레이트 동역학 외란에도 견실하게 제동 압력을 예측할 수 있는 실제 압력의 해석적 중복 역할을 훌륭하게 수행할 수 있기 때문에 해당 제동 제어 시스템의 컴포넌트 레벨 고장 진단 로직에 활용이 가능하며 이는 시스템 신뢰성 확보에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

이 논문은 2015 년도 한국기술교육대학교 신임 교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌 (References)

- (1) Pilutti, T., Ulsoy, G. and Hrovat, D., 1998, "Vehicle Steering Intervention Through Differential Braking," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, pp. 314~321.
- (2) You, S. H., Jo, J. S., Yoo, S., Hahn, J. O. and Lee, K. I., 2006, "Vehicle Lateral Stability Management Using Gain-Scheduled Robust Control," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1898~1913.
- (3) Lee, J., Choi, J., Yi, K., Shin, M. and Ko, B., 2014, "Lane-Keeping Assistance Control Algorithm Using Differential Braking to Prevent Unintended Lane Departures," *Control Engineering Practice*, Vol. 23, pp. 1~13.
- (4) Choi, J., Yi, K., Suh, J. and Ko, B., 2014, "Coordinated Control of Motor-Driven Power Steering Torque Overlay and Differential Braking for Emergency Driving Support," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, pp. 566~579.
- (5) Kakalis, L., Zorzutti, A., Cheli, F. and Travaglio, G., 2008, "Brake Based Torque Vectoring for Sport Vehicle Performance Improvement," *SAE Paper 2008-01-0591*.
- (6) You, S. H., Cho, Y. M. and Hahn, J. O., 2013, "A Component-Level Failure Detection and Identification Algorithm Based on Open-Loop and Closed-Loop State Estimators," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 36, No. 2, pp. 471~486.
- (7) Hong, D., Hwang, I., Sunwoo, M. and Huh, K., 2007, "Maximum Braking Force Control Utilizing the Estimated Braking Force," *International journal of automotive technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 211~217.
- (8) Van Zanten, A. T., Erhardt, R., Pfaff, G., Kost, F., Uwe, H. and Ehret, T., 1996, "Control Aspects of the Bosch-VDC," *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control*, pp. 573~608.

- (9) Wang, S.H., Kou, T.S. and Hsu, C.F., 1987, "Optimal-Observer Design for Linear Dynamical Systems with Uncertain Parameters", *International Journal of Control*, Vol. 45, No. 2, pp. 701~711.
- (10) ZAK, S.H., 1990, "On the Stabilization and Observation of Nonlinear/Uncertain Dynamic Systems," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 35, No. 5, pp. 604~607.
- (11) Walcott, B.L. and Zak, S.H., 1987, "State Observation of Nonlinear Uncertain Dynamical Systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 32, pp. 166~170.
- (12) Cho, Y.M. and Rajamani, R., 1997, "A Systematic Approach to Adaptive Observer Synthesis for Nonlinear Systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 42, pp. 534~537.
- (13) You, S.H., Hahn, J.O., Cho, Y.M. and Lee, K.I., 2006, "Modeling and Control of a Hydraulic Unit for Direct Yaw Moment Control in an Automobile," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, pp. 1011~1022.
- (14) Boyd, S., Ghaoui, L.E., Feron, E. and Balakrishnan, V., 1994, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM, Philadelphia.