

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0034

상태변수/노면입력 관측기를 이용한 반능동 현가시스템 제어

States/Road Input Observer-based Control of Semi-active Suspensions

김정현*, 이경수**
Junghun Kim, Kyongsu Yi

ABSTRACT

This paper deals with an observer-based preview control for semi-active suspensions. An Observer has been designed such that all the state variables and road inputs can be estimated from accelerations. Since the road input to the rear wheels is a delayed version of that to the front wheels, it can be obtained by estimating the road input to the front wheels without preview sensors. The performance of LQ optimal control and the wheelbase preview control using the estimated values of state and the estimated road input has been investigated. The results show that the observer-based control can provide good performance. The observer-based preview control improves the dynamic behavior of the rear axle and that of pitch motion compared to the LQ optimal control.

주요기술용어 : Observer(관측기), Semi-active Suspension(반능동현가장치), Preview Control (예견제어), LQ Optimal Control (LQ 최적제어)

1. 서론

능동, 반능동 현가시스템의 연구는 자동차 기술의 발달과 함께 꾸준히 진행되어 왔으며

기존의 수동 현가장치에 비해 향상된 승차감 (ride comfort)과 주행안정성(driving safety)의 성능을 제공할 수 있다. 그러나 능동 현가 시스템은 에너지소모가 크고 고가이므로 실용화에 문제가 있으며 반능동 현가시스템은 이미 상용화되었다.¹⁻³⁾

반능동 현가시스템을 이용하여 차량을 제어할 때 제어방법에 따라 차이는 있으나 여러 가지의 차량의 상태변수에 관한 정보를 필요

* 회원, 한양대학교 자동차공학과 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

로 하게 된다. 그러나 측정이 불가능한 경우가 있을 뿐만 아니라 측정이 가능하더라도 센서의 가격이 고가이다 따라서 최소의 변수만을 직접 측정하고 나머지는 필터나 관측기를 사용하여 그 값을 추정하게 된다.³⁻⁵⁾

차량의 현가장치에서의 예견제어(preview control)는 1968년 Bender에 의해 1자유도 모델에서 처음 제안되었고 그 후 1/4 차량(Thompson at al.)과 1/2 차량(Balzer)의 능동 현가장치에서의 예견제어가 연구되었으며 반능동 현가장치에서의 예견제어의 제어효과도 지속적으로 연구되어왔다.(Hac and Young)⁶⁾

예견센서(preview sensor)를 이용하여 각 바퀴에 노면입력을 예측하고 이를 이용하여 현가장치를 제어하는 방법이 연구되어왔고 뒷바퀴가 앞바퀴와 같은 노면을 따라갈 때 앞바퀴의 노면입력을 이용하여 현가장치를 제어하는 방법도 연구되어왔다.^{6~11)}

본 논문은 1/2 차량을 모델로 실제 상태변수의 측정없이 앞, 뒷차체 가속도와 앞차축 가속도만을 이용하여 차량의 상태변수와 앞바퀴의 노면입력을 추정하고 이를 이용하여 LQ 최적제어와 예견제어(wheelbase preview control)를 수행하였다. 예견센서를 이용하여 앞, 뒷바퀴의 노면 입력을 예측하여 차량을 제어할 수 있으나 예견센서가 필요하게되고 실용화에 문제가 있으므로 이 논문에서는 추정된 차량의 상태변수를 이용하여 앞바퀴에 전달되는 노면입력을 추정한 후 뒷바퀴로 전달될 노면입력만을 예측하여 예견제어를 수행하였다.

2. 반능동 현가시스템

Fig 1은 4 자유도계 1/2차량 모델을 나타낸 것이다.

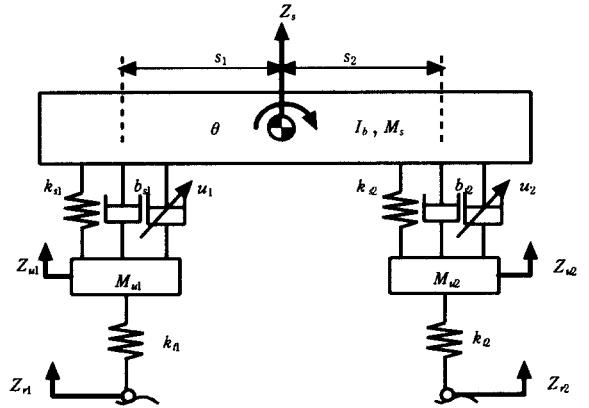


Fig. 1 A Half Car Suspension Model

상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$x_1 = Z_s + s_1\theta - Z_{u1}$$

$$x_2 = \dot{Z}_s + s_1 \dot{\theta}$$

$$x_3 = Z_s - s_2\theta - Z_{u2}$$

$$x_4 = \dot{Z}_s - s_2 \dot{\theta}$$

$$x_5 = Z_{u1} - Z_{r1}$$

$$x_6 = \dot{Z}_{u1}$$

$$x_7 = Z_{u2} - Z_{r2}$$

$$x_8 = \dot{Z}_{u2}$$

1/2차량 모델에 대한 운동방정식은 다음과 같은 상태방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fw \tag{1}$$

$$y = Cx + Du + v$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -ak_n & -ab_n & -bk_z & -bb_z & 0 & 0 & ab_n & 0 & bb_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -bk_n & -bb_n & -ck_z & -cb_z & 0 & 0 & bb_n & 0 & cb_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_n}{M_{u1}} & \frac{b_n}{M_{u1}} & 0 & 0 & -\frac{k_n}{M_{u1}} & -\frac{b_n}{M_{u1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{k_z}{M_u} & \frac{b_z}{M_u} & 0 & 0 & -\frac{k_z}{M_u} & -\frac{b_z}{M_u} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 & b & 0 & -\frac{1}{M_{u1}} & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & c & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_{u2}} \end{bmatrix} r$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} -ak_{s1} & -ab_{s1} & -bk_{s2} & -bb_{s2} & 0 & ab_{s1} & 0 & bb_{s2} \\ \frac{k_{s1}}{M_{s1}} & \frac{b_{s1}}{M_{s1}} & 0 & 0 & -\frac{k_{s1}}{M_{s1}} & -\frac{b_{s1}}{M_{s1}} & 0 & 0 \\ -bk_{s1} & -bb_{s1} & -ck_{s2} & -cb_{s2} & 0 & bbs_1 & 0 & cb_{s2} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} a & b \\ -\frac{1}{M_{s1}} & 0 \\ b & c \end{bmatrix}$$

$$a = \left(\frac{1}{M_s} + \frac{s_1^2}{I_b} \right) \quad b = \left(\frac{1}{M_s} - \frac{s_1 s_2}{I_b} \right)$$

$$c = \left(\frac{1}{M_s} + \frac{s_2^2}{I_b} \right)$$

$$x(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$$

$$y(t) = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$$

$$u(t) = [u_1 \ u_2]^T, \quad w(t) = [\dot{z}_1 \ \dot{z}_2]^T$$

$$v(t) = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$$

$w(t)$ 는 외란으로 작용하며 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$w_1 = \dot{z}_1 \quad w_2 = \dot{z}_2 \tag{2}$$

$$w_2(t) = w_1(t - \tau)$$

여기서, $\tau = \frac{s_1 + s_2}{v}$ 이며 v 는 차량의 속도이다.

$v_i (i=1, 2, 3)$ 는 측정 시 포함되는 백색잡음(white Gaussian noise)이고 $y_i (i=1, 2, 3)$ 는 가속도 센서로 측정되는 잡음이 포함된 앞차체가속도, 앞차축가속도, 뒷차체가속도이다.

$u_i (i=1, 2)$ 는 액츄에이터나 가변댐퍼에 의해 발생하는 감쇠력(damping force)이다.

3. 관측기 설계

3.1 관측기 설계

앞차체가속도와 앞차축가속도와 뒷차체가속도의 측정 신호를 받아 관측기를 설계한다. 먼저 현가장치 변위와 상대속도를 추정하고 이를 이용하여 차체속도와 차축속도를 추정하는 관측기를 설계하였다. 그리고 뒷현가장치 속도와 뒷타이어 변위는 추정변수와 제어입

력, 그리고 측정된 가속도의 대수결합(algebraic combination)으로 추정되고 이 때문에 다소의 노이즈(noise)가 발생된다.

가속도를 측정하는 센서는 항상 노이즈가 포함되므로 가속도 신호는 아래와 같이 나타난다.

$$y_1 = \ddot{z}_s + s_1 \cdot \ddot{\theta} + v_1$$

$$y_2 = \ddot{z}_{u1} + v_2 \tag{3}$$

$$y_3 = \ddot{z}_s - s_2 \cdot \ddot{\theta} + v_3$$

이처럼 가속도 신호에 노이즈가 포함된 경우 현가장치의 변위와 상대속도를 추정하는 관측기는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\hat{x}_1 = \hat{z}_1 + l_1(y_1 - \hat{y}_1) \tag{4}$$

$$\hat{z}_1 = \left(\frac{b^2}{c} - a \right) k_{s1} \hat{x}_1 + \left(\frac{b^2}{c} - a \right) b_{s1} \hat{z}_1 - \left(\frac{b^2}{c} - a \right) \hat{u}_1 - y_2 + \frac{b}{c} y_3 + l_2(y_1 - \hat{y}_1) \tag{5}$$

$$\hat{x}_3 = \hat{z}_2 + l_3(y_1 - \hat{y}_1) \tag{6}$$

$$\hat{z}_2 = -\frac{b}{c} \cdot \frac{k_{s1}}{b_{s2}} \hat{x}_1 - \frac{b}{c} \cdot \frac{b_{s1}}{b_{s2}} \hat{z}_1 - \frac{k_{s2}}{b_{s2}} \hat{x}_3 + \frac{b}{c} \cdot \frac{1}{b_{s2}} \hat{u}_1 + \frac{1}{b_{s2}} \hat{u}_2 - \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{b_{s2}} y_3 \tag{7}$$

여기서, $\hat{z}_1 = \widehat{x_2 - x_6}$ $\hat{z}_2 = \widehat{x_4 - x_8}$

위에서 \hat{u}_1, \hat{u}_2 는 추정된 신호를 이용하여 구한 제어입력이고 \hat{y}_1 은 추정된 신호로 구한 앞차체가속도이다.

추정된 현가장치의 변위와 상대속도를 이용하여 차체속도와 차축속도, 그리고 타이어 변위를 아래와 추정한다.

$$\hat{x}_2 = -a \cdot k_{s1} \hat{x}_1 - a \cdot b_{s1} \hat{z}_1 - b \cdot k_{s2} \hat{x}_3 - b \cdot b_{s2} \hat{z}_2 + a \hat{u}_1 + b \hat{u}_2 + l_4(y_1 - \hat{y}_1) \tag{8}$$

$$\hat{x}_4 = y_3 + l_5(y_1 - \hat{y}_1) \tag{9}$$

$$\hat{x}_6 = y_2 + l_6(y_1 - \hat{y}_1) \tag{10}$$

$$\hat{x}_8 = \frac{k_2}{M_{12}} \hat{x}_3 + \frac{bs_2}{M_{12}} \hat{z}_2 - \frac{k_2}{M_{12}} \hat{x}_7 - \frac{1}{M_{12}} \hat{u}_2 + l_7(y_1 - \hat{y}_1) \quad (11)$$

$$\hat{x}_5 = \frac{k_{s1}}{k_{f1}} \hat{x}_1 + \frac{b_{s1}}{k_{f1}} \hat{z}_1 - \frac{1}{k_{f1}} \hat{u}_1 - \frac{M_{u1}}{k_{f1}} y_2 \quad (12)$$

$$\hat{x}_7 = \frac{M_{12}}{k_2} (b \cdot k_{s1} \hat{x}_1 + b \cdot b_{s1} \hat{z}_1 + \gamma \cdot k_2 \hat{x}_3 + \gamma b_2 \hat{z}_2 + \hat{z}_2 - b \cdot \hat{u}_1 - \gamma \cdot \hat{u}_2) \quad (13)$$

여기서, $\gamma = c + \frac{1}{M_{12}}$

3.2 필터설계

차체속도와 차축속도를 추정하는 관측기는 현가장치의 변위와 현가장치의 상대속도의 추정 결과를 이용하기 때문에 항상 일정한 오차를 보이며 추정하게된다. 그러므로 오차의 성분인 저주파성분을 제거하기 위해 Butterworth 2차 고주파통과 필터(highpass filter)를 아래와 같이 설계하였다.

$$H_K(s) = \frac{1}{s^2 + 1.4142s + 1} \quad (14)$$

절단 주파수(cutoff frequency) (ω_c)에 따른 전달함수 $H_K\left(\frac{\omega_c}{s}\right)$ 이다.

3.3 오차동역학

관측기의 오차동역학(error dynamics)은 다음과 같다.

$$\dot{e} = Fe + Hv \quad (15)$$

$$F = \begin{bmatrix} -l_1 \beta k_{s1} & 1 - l_1 \beta (bs_1 + u_f) \\ (1 - l_2) \beta k_{s1} & \beta (1 - l_2) (bs_1 + u_f) \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} -l_1 & 0 & l_1 \frac{b}{c} \\ -l_2 & 1 & (l_2 - 1) \frac{b}{c} \end{bmatrix}$$

여기서, $e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - \hat{x}_1 \\ z_1 - \hat{z}_1 \end{bmatrix}$

$$v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T \quad \beta = \frac{b^2}{c} - a$$

$$z_1 = x_2 - x_6$$

$$\hat{z}_1 = \widehat{x_2 - x_6}$$

위 식의 특성방정식(characteristic equation)은 아래와 같고

$$s^2 + [l_1 \beta k_{s1} - \beta (1 - l_2) (b_{s1} + u_f)] s - (1 - l_2) \beta k_{s1} = 0 \quad (16)$$

점근적으로 안정(asymptotically stable)하기 위해서는 관측기 이득은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$l_2 < 1 \quad (17)$$

$$l_1 < \frac{(1 - l_2)(b_{s1} + u_f)}{k_{s1}} \quad (18)$$

노이즈의 영향을 고려하여 오차분산(error variance)을 최소화하는 관측기 이득을 구한다. 정상상태에서 오차분산은 다음의 식을 만족하므로

$$\dot{X} = FX + XF^T + HVV^T H^T = 0 \quad (19)$$

여기서, $X(t) = E[e(t)e(t)^T]$

$$V_t = E[v(t)v(t)^T] = \begin{bmatrix} V_{1t} & 0 & 0 \\ 0 & V_{2t} & 0 \\ 0 & 0 & V_{3t} \end{bmatrix}$$

이를 최소화하는 l_1 과 l_2 를 선정하고 나머지 관측기 이득은 시뮬레이션을 통해 선정하였다.

4. 노면 입력 추정

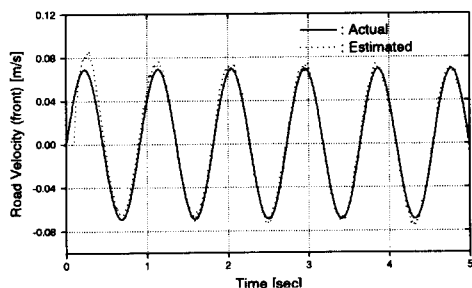
관측기에 의해 추정된 앞차축 속도와 앞타이어 변위를 이용하여 아래와 같이 앞바퀴노면을 추정할 수 있다.

$$\dot{Z}_n = \dot{Z}_{u1} - (\dot{Z}_{u1} - \dot{Z}_n) = x_6 - \dot{x}_5$$

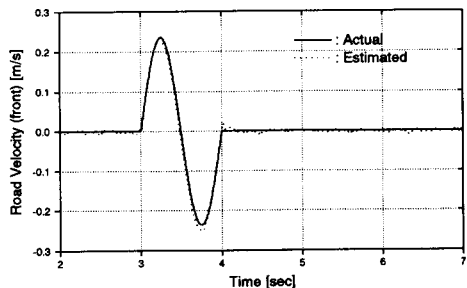
$$\hat{Z}_n = \hat{x}_6 - \hat{x}_5 \quad (20)$$

노면의 속도가 차량의 입력이 되므로 타이어 속도가 필요하게 되고 미분에서 발생하는 고주파성분을 없애기 위해 저주파통과 필터(lowpass filter)가 사용된다.

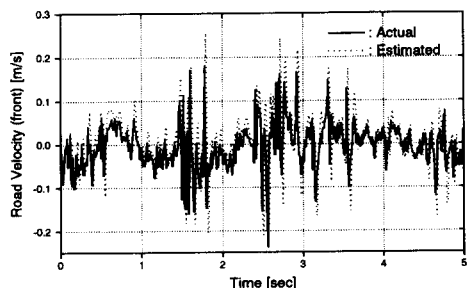
Fig2는 1.1[Hz] 정현파노면과 범퍼노면 그리고 미국 고속도로에서 측정한 랜덤노면을 추정한 것이다. 정현파노면과 범퍼노면 그리고 랜덤노면에서 잘 추정함을 보여준다. 그러나 필터의 영향으로 위상변화(phase shift)가 발생하므로 고주파노면일 경우 제어효과가 나빠진다.



(a) Sine Road



(b) Bump Road



(c) Random Road

Fig. 2 Road Input Estimation

5. 제어기 설계

5.1 상태변수/노면추정을 이용한 예견 제어

승차감과 조종 안정성 그리고 현가장치외 공간을 고려하고 제어 힘의 한계를 고려하여 성능지수를 정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 J &= \lim_{T_f \rightarrow \infty} \frac{1}{2T_f} E \left[\int_0^{T_f} [x^T Q x + 2x^T N u + u^T R u] dt \right] \\
 &= \lim_{T_f \rightarrow \infty} \frac{1}{2T_f} E \left[\int_0^{T_f} [\dot{Z}_s^2 + \rho_1 \ddot{\theta}^2 + \rho_2 x_1^2 + \rho_3 x_3^2 \right. \\
 &\quad \left. + \rho_4 x_5^2 + \rho_5 x_7^2 + \rho_6 u_1^2 + \rho_7 u_2^2] dt \right] \\
 &= J_{z_s} + J_{\theta} + J_{x_1} + J_{x_3} + J_{x_5} + J_{x_7} + J_{u_1} + J_{u_2} \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$Q = A_n^T A_n + \rho_1 A_m^T A_m + \rho_n$$

$$N = A_n^T B_n + \rho_1 A_m^T B_m$$

$$R = \rho_1 B_m^T B_m + B_n^T B_n + \rho_m$$

$$A_n = \frac{s_2}{s_1 + s_2} A_2 + \frac{s_1}{s_1 + s_2} A_4$$

$$B_n = \frac{s_2}{s_1 + s_2} B_2 + \frac{s_1}{s_1 + s_2} B_4$$

$$A_m = \frac{1}{s_1 + s_2} A_2 - \frac{1}{s_1 + s_2} A_4$$

$$B_m = \frac{1}{s_1 + s_2} B_2 - \frac{1}{s_1 + s_2} B_4$$

$$A_2 = [-ak_{s1} \quad -ab_{s1} \quad -bk_{e2} \quad -bb_{e2} \quad 0 \quad ab_{s1} \quad 0 \quad bb_{e2}]$$

$$A_4 = [-bk_{s1} \quad -bb_{s1} \quad -ck_{e2} \quad -cb_{e2} \quad 0 \quad bb_{s1} \quad 0 \quad cb_{e2}]$$

$$B_2 = [a \quad b] \quad B_4 = [b \quad c]$$

$$\rho_n = \begin{bmatrix} \rho_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\rho_m = \begin{bmatrix} \rho_6 & 0 \\ 0 & \rho_7 \end{bmatrix}$$

위 성능지수를 최소화하는 제어입력은 아래

와 같이 표시되며

$$\begin{aligned} u &= -R^{-1}(B^T P + N^T)x - R^{-1}B^T H \\ &= -Gx + M \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 P, H 는 다음과 같이 제어대수 Riccati 식으로부터 구해진다.

$$P + PA + A^T P - (PB + N)R^{-1}(B^T P + N) = 0 \quad (23)$$

$$\dot{H} = -A_c^T H - P F \omega \quad (24)$$

$$H(t, t_p) = \int_0^{t_p + \tau} e^{A_c^T \eta} P F \left[\begin{array}{c} \delta(t_p - \eta) w_1(t + \eta) \\ w_1(t + \eta - \tau) \end{array} \right] d\eta \quad (25)$$

$$\text{여기서, } \delta(t_p - \eta) = \begin{cases} 1 & \text{for } \eta \leq t_p \\ 0 & \text{for } \eta > t_p \end{cases}$$

$$-A_c^T = (-A^T + PBR^{-1}B^T + NR^{-1}B^T)$$

t_p : 예견시간(preview time)

그러나 실제 상태변수와 노면입력을 알 수 없으므로 추정된 값을 사용하고 예견센서없이 앞바퀴의 노면입력을 알 수 없으므로 추정된 앞바퀴의 노면입력을 이용하여 예견제어 (wheelbase preview)하면 다음과 같이 \widehat{H} 을 구할 수 있다.

$$\widehat{H}(t) = \int_0^\tau e^{A_c^T \eta} P F \left[\begin{array}{c} 0 \\ \widehat{w}_1(t + \eta - \tau) \end{array} \right] d\eta \quad (26)$$

$$\widehat{w}_2(t) = \widehat{w}_1(t - \tau) \quad \text{여기서, } \tau = \frac{s_1 + s_2}{v}$$

5.2 반능동 댐퍼 제어방법

반능동 댐퍼의 경우 감쇠력은 댐퍼의 상대 속도와 감쇠계수(Damping Rate)의 함수로 표시되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_1 = -v_1(x_2 - x_6) \quad (27)$$

$$u_2 = -v_2(x_4 - x_8) \quad (28)$$

그러나 현실적으로는 반능동제어인 경우 감쇠 계수의 한계가 있으므로 실제 제어범위는 다

음과 같다.

$$\Omega = \{v_i | v_{i, \min} \leq v_i \leq v_{i, \max}\}, i = 1, 2 \quad (29)$$

위와 같은 범위에서 가능한 원하는 감쇠력에 가깝게 하기 위한 효과적인 제어 방법은 다음과 같이 표시된다.

$$v_i(t) = \begin{cases} v_{i, \min} & \text{if } v_i^* \leq v_{i, \min} \\ v_i^*(t) & \text{if } v_{i, \min} < v_i^* < v_{i, \max} \\ v_{i, \max} & \text{if } v_{i, \max} \leq v_i^* \end{cases}, i = 1, 2 \quad (30)$$

실제 차량의 상태변수를 알 수 없으므로 추정된 상태변수를 이용하면 다음과 같이 감쇠 계수를 구할 수 있다.

$$v_1^* = \frac{\widehat{u}_1}{\widehat{z}_2} \quad v_2^* = \frac{\widehat{u}_2}{\widehat{z}_4} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{u}_1 \\ \widehat{u}_2 \end{bmatrix} = \widehat{u} = -G\widehat{x} + \widehat{M} \quad (32)$$

6. 시뮬레이션 결과

Table 1,2와 3은 10초 동안의 시뮬레이션을 통해 무게중심에서의 가속도, 피치(Pitch) 가속도, 앞현가장치의 변위, 뒷현가장치의 변위, 앞타이어 변위와 뒷타이어 변위의 성능지수를 나타낸 것이다.

제어를 하지 않을 경우의 성능지수를 100으로 두고 반능동제어와 능동제어의 상대적인 제어성능을 비교하고 실제 상태변수의 값을 가지고 제어할 때와 관측기로 추정된 상태변수의 값으로 제어할 때의 상대적인 제어성능 비교하여 나타내었다.

Table 1과 2는 정현파 노면입력과 범포노면 입력일 경우의 성능지수를 비교한 것이다. 반능동제어일 경우 능동제어보다는 제어효과가 떨어지나 충분한 제어성능을 보였고 차량의

피치 가속도와 뒷현가장치의 변위 그리고 뒷타이어의 변위에서 LQ 최적제어에 비해 앞바퀴노면을 이용한 예견제어의 성능이 현저하게 향상되었다. 관측기에 의해 추정된 신호를 이용하여 제어하는 것이 실제신호를 이용하여 제어하는 것보다 성능은 다소 떨어지나 충분한 제어 효과가 있었다.

Table 1 Performance Index (sine input)

			$J_{\ddot{z}_s}$	J_{δ}	J_{x_1}	J_{x_3}	J_{x_5}	J_{x_7}	J
passive			100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
semi-active	LQ	actual	68.8	51.3	91.6	95.8	57.6	84.0	71.4
		estimate	73.5	48.5	93.7	86.2	57.9	88.8	73.4
	Preview	actual	74.9	34.4	99.6	54.5	55.6	73.9	67.3
		estimate	79.2	33.6	103.1	50.2	56.7	79.6	70.1
active	LQ	actual	20.2	13.9	129.3	215.8	8.1	52.9	46.8
	Preview	actual	21.8	3.6	122.5	128.6	9.3	35.7	35.6

Table 2 Performance Index (bump input)

			$J_{\ddot{z}_s}$	J_{δ}	J_{x_1}	J_{x_3}	J_{x_5}	J_{x_7}	J
passive			100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
semi-active	LQ	actual	59.0	49.8	81.5	100.9	46.2	80.0	62.2
		estimate	66.1	36.0	81.6	82.0	46.2	94.0	65.7
	Preview	actual	64.6	24.3	84.1	56.9	43.6	72.7	58.8
		estimate	70.4	22.6	85.1	49.1	43.8	86.0	62.8
active	LQ	actual	17.4	15.2	71.8	150.3	9.5	51.5	33.4
	Preview	actual	18.1	5.9	70.5	93.2	10.1	30.9	25.8

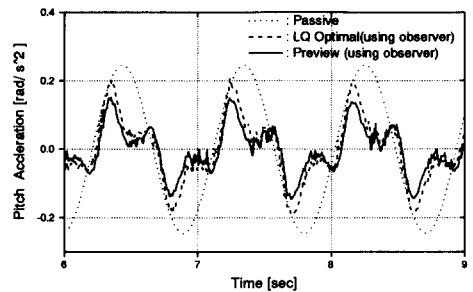
Table 3은 랜덤노면입력일 경우의 성능지수를 비교한 것이다. 랜덤노면일 경우도 위의 정현파노면이나 범퍼노면과 비슷한 결과를 보이나 추정한 노면입력을 이용하여 예견제어(wheelbase preview control)를 한 경우 필터로 인한 고주파 성분 노면의 위상변화(phase shift)로 인해 오히려 LQ 최적제어에 비해 제

어성능이 나빠졌다.

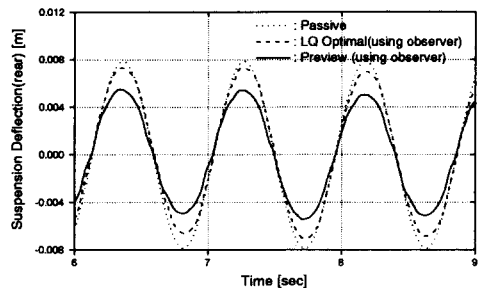
Table 3 Performance Index (random input)

			$J_{\ddot{z}_s}$	J_{δ}	J_{x_1}	J_{x_3}	J_{x_5}	J_{x_7}	J
passive			100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
semi-active	LQ	actual	68.2	62.4	109.8	135.9	92.3	99.4	81.8
		estimate	77.2	64.2	118.7	112.1	96.3	117.6	90.9
	Preview	actual	73.6	55.7	118.7	96.1	96.0	69.5	73.0
		estimate	90.0	65.0	123.6	106.3	99.0	114.2	95.8
active	LQ	actual	40.0	56.2	236.6	254.7	111.1	94.7	75.5
	Preview	actual	37.8	51.3	206.5	159.8	117.8	34.3	51.4

Fig 3은 관측기를 이용하여 제어할 때 LQ 최적제어와 예견제어(wheelbase preview control)의 성능을 비교한 것이다. 차량의 피치 가속도와 뒷현가장치의 변위 그리고 뒷타이어의 변위에서 LQ 최적제어에 비해 앞바퀴노면을 이용한 예견제어의 성능이 향상되었다.



(a) Pitch Acceleration



(b) Suspension Deflection (rear)

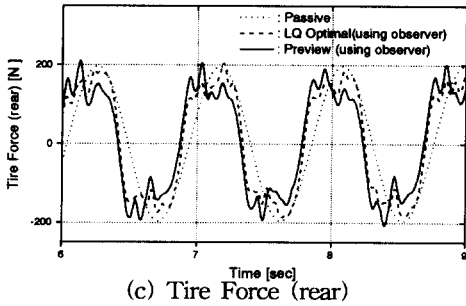


Fig. 3 Simulation Result Using Observer

7. 결론

현가시스템의 상태변수 추정을 위한 관측기를 설계하고 앞바퀴 노면을 추정하여 예견제어를 수행하였다. 앞차축가속도와 앞차체가속도 그리고 뒷차체가속도만을 이용하여 차량의 상태변수와 노면입력의 추정이 가능함을 보였고 실제 상태변수를 이용하여 제어하는 것보다 제어성능이 우수하지는 않으나 관측기로 추정된 상태변수를 이용하여 제어하는 것은 충분한 제어성능을 보였다. 앞바퀴 노면을 추정하여 뒷바퀴로 전달될 노면입력을 예측하고 이를 이용하여 예견제어를 수행하였을 경우 고주파노면의 경우 필터로 인한 위상 변화로 인해 제어성능이 LQ 최적제어에 비해 나빠지나 저주파 노면의 경우 피치가속도와 뒷현가 장치의 변위 그리고 뒷타이어힘에서 LQ 최적제어에 비해 우수한 성능을 보였다.

후 기

이 논문은 1999년 한양대학교 교내 연구비에 의해 연구되었다.

참 고 문 헌

1) Teng, H. E., Yi, K., and Hedrick, J.K., "A Comparison of Alternative Semi-active Control Laws," ASME WAM, Atlanta, Georgia, December 1~6, 1991.

2) Hrovat, D., Margoils, D.L., and Hubbard, M., "An Approach toward the Optimal Semi-active Suspensions," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, NO. 3, pp. 288~296, 1988.

3) Yi, K., Cha S., and Song B., "Observer Design for Semi-active Suspension Control" AVEC, pp. 75~80, 1998.

4) Yi, K. "Design of Disturbance Decoupled Bilinear Observer" KSME Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 344~350, 1995.

5) Hedrick J. K., Rajamani R. and Yi K., "Observer Design for Electronic Suspension Application", Vehicle system Dynamics, pp. 413~440, 1994.

6) Jezequel L. and Roberti V., "Optimal Preview Semiactive Suspension" ASME, Vol. 118, pp.99~105, 1996.

7) Hac, A, and Youn, I., "Optimal Design of Active and Semi-active Suspensions Including Time Delays and Preview," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol.115, pp. 498~508, 1993.

8) Roh H.-S. and Park Y., "Design of State and Input Observer for Wheelbase Preview Control in Vehicle Suspension System", AVEC, pp. 45~50, 1998.

9) Hac, A, "Design of Disturbance Decoupled Observer for Bilinear Systems," ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, California, 1989.

10) Roh H.-S. and Park Y., "Design of Active Suspension Controller for Commercial Vehicles", AVEC, pp. 78~86, 1996.

11) Moran A, Nagai and M, Hayase M, "Design of Active Suspensions with H_∞ Preview Control", AVEC, pp. 215~232, 1996.