

상용 차량의 축거 예견 제어를 위한 미지 입력 관측기 설계

Design of Unknown Input Observer for Wheelbase Preview Control of Commercial Vehicles

오노현석, 박영진

한국 과학 기술원 기계공학과 (Tel: 869-3076; Fax: 869-3095; E-mail: s_cute@cais.kaist.ac.kr)

Abstracts

An unknown input observer is proposed that can be used in wheelbase preview control of commercial vehicles. The preview and state information, required to calculate actuator force, are reconstructed from the measurement variables such as heave and pitch acceleration. Gain matrix of observer is optimally selected so that influence of system and measurement noises on the estimation error can be minimized. Estimated preview information requires low pass filtering to eliminate high frequency components resulting from differentiation of noisy output signals. Effectiveness of the proposed method is demonstrated by numerical simulation of half car model.

Keywords Wheelbase Preview Control, Unknown Input Observer, Optimal Gain Selection

1. 서론

예견 정보 즉, 현가 장치 전방의 노면 정보를 능동 현가 제어기에 사용하는 예견 제어(preview control)는 Bender에 의해 처음 제안된 이후 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. [1,2] 예견 정보를 얻는 방법에 따라 예견 제어는 두 가지로 분류할 수 있는데 그 중 하나는 예견 센서를 이용한 것이고 다른 하나는 앞바퀴의 응답으로부터 노면 정보를 추정하는 축거 예견 제어(wheelbase preview control)이다.

예견 센서를 사용하는 예견 제어에 비해 축거 예견 제어는 예견 시간이 제한되고, 뒷바퀴에만 예견 제어를 사용할 수 있다는 점에서 단점을 가지지만, 물웅덩이와 같은 예견 센서가 감지해 낼 수 없는 노면 정보의 감지가 가능하다는 면에서 보다 신뢰성을 가진다고 할 수 있다. 특히 상용 차량의 경우, 축거가 일반 차량에 비해 길어 충분한 예견 시간을 보장할 수 있으며, 열악한 노면에서의 운행으로 인한 예견 센서의 파손 가능성을 고려할 때 상용 차량에서의 축거 예견 제어는 그 의미를 가진다. 한편, 축거 예견 제어를 실제로 구현하기 위해선 상태 변수에 대한 정보와 함께 피드 포워드 입력에 필요한 뒷바퀴 노면 입력 정보가 필요하다. 그러나, 기존의 Luenberger 관측기나 Kalman-Bucy 필터는 상태 변수의 추정을 위해 모든 입력의 정보를 필요로 한다는 점에서 예견 제어에 적용이 힘들다.

이를 해결하기 위해, Yoshimura 등은 시스템과 노면의 동력학을 결합하여 LQG 문제로 변환 시킨 후 이에 대한 Kalman filter를 설계하였다. [3] 그러나, 이 방법은 노면 입력에 대한 모델을 필요로 하며, 둔턱과 같은 결정론적인 노면에 대해 성능을 보장할 수 없다는 점에서 적용하기 어렵다. Huisman 등은 2차 적분기를 이용한 추가 출력법(Augmented output method)을 제안하였다. [4] 이 방법은 결정론적인 노면에 대해서도 사용 가능하다는 장점을 지니지만, 2차 적분기의 사용에서 오는 적분 오차 및 보다 엄격한 관측 조건(observability condition)등의 단점을 지닌다.

본 논문에서는 미지 입력 관측기(Unknown Input Observer, UIO) [5, 6]를 이용한 축거 예견 제어에 대해 고려하도록 한다. 미지 입력 관측기는 고장 진단 기법을 위해 제안된 방법으로 미지의 입력에도 불구하고 상태 변수를 추정할 수 있다. 본 논문에서 제안되는 미지 입력 관측기는 기존의 Kalman-Bucy 필터에 미지 입력에 대한 추정 항이 추가된 형태를 띠며, 그 이득 행렬은 추정 오차에 대한 시스템 및 측정 잡음의 영향을 최소화시키도록 설정된다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다. 단락 2에서는 1/2 차량 모델이 제시되며, 단락 3에서는 축거 예견 제어를 이용한 능동 현가 장치의 제어가 설명된다. 단락 4에서는 노면 입력 및 상태 변수 정보를 결정하기 위한 미지 입력 관측기가 제안되며 마지막으로 단락 6에서는 제안된 미지 입력 관측기를 이용한

축거 예견 제어기의 성능이 4 자유도의 1/2 차량 모델에서의 모의 실험을 통해 검증된다.

2. 1/2 차량 모델

2.1 운동 방정식

그림 1에는 본 논문에서 고려된 4자유도 차량 모델이 주어져 있다. 그림에서 k_{f1}, k_{r1} 과 b_f, b_r 은 각각 앞 뒤의 현가 장치 내의 강성 및 감쇠 계수를 나타낸다. 현가 장치에 힘 구동기 이외에 수동 현가 장치를 추가한 이유는 요구되는 제어 입력의 크기 감소와 현가 장치의 신뢰성 향상을 위해서이다.

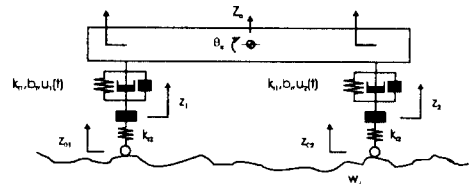


그림 1. 차량 모델

현가 상 질량 M 과 현가 하 질량 m_f, m_r 사이에 위치한 힘 작동기는 제어력 u_1, u_2 를 내며, 이들 내부의 동력학은 본 논문에서 무시되었다

z_{01}, z_{02} 는 각각 앞뒤 타이어에 걸리는 노면 변위를 나타내며, 본 연구에서는 차량이 직선 운동을 한다는 가정하에 이들 노면 변위 사이에 다음 관계가 만족한다고 보았다.

$$z_{02}(t) = z_{01}(t - \tau)$$

여기서, $\tau = (a+b)/v$ (v : 차량 속도, $a+b$: 축거(wheelbase)). 수동 현가 장치의 요소들이 선형 관계를 만족하고, 피치 운동 θ 가 작을 경우, 모델은 다음과 같은 운동 방정식을 만족한다.

$$\begin{aligned} M\ddot{z}_c &= f_f + f_r \\ \ddot{\theta}_c &= f_f a - f_r b \end{aligned} \quad (1)$$

$$m_f \ddot{z}_1 = -k_{f1}(z_1 - z_c - a\theta) - f_f$$

$$m_r \ddot{z}_2 = -k_{r1}(z_2 - z_c + b\theta) - f_r$$

여기서, f_f 와 f_r 은 앞뒤의 현가력(suspension force)을 나타낸다.

$$f_f = k_{f1}(z_1 - z_c - a\theta) + b_f(\dot{z}_1 - \dot{z}_c - a\dot{\theta}) + u_1 \quad (2)$$

$$f_r = k_{r1}(z_2 - z_c + b\theta) + b_r(\dot{z}_2 - \dot{z}_c + b\dot{\theta}) + u_2$$

2.2 상태 방정식

다음의 상태, 입력, 외란 벡터를 정의하면

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T, \quad u = [u_1 \ u_2]^T, \quad w = [w_1 \ w_2]^T$$

여기서,

$$\begin{aligned} x_1 &= z_c + a\theta - z_1, & x_2 &= \dot{z}_c - a\dot{\theta} \\ x_3 &= z_c - b\theta - z_2, & x_4 &= \dot{z}_c - b\dot{\theta} \\ x_5 &= z_1 - z_{01}, & x_6 &= \dot{z}_1 \\ x_7 &= z_2 - z_{02}, & x_8 &= \dot{z}_2 \\ w_1 &= \dot{z}_{01}(t), & w_2 &= w_1(t - \tau) \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 식은 다음과 같이 상태 방정식의 형태로 쓰여 질 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \quad (4)$$

한편, 측정 방정식은 상태 벡터와 입력 벡터를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y = Cx + Du \quad (5)$$

3. 추거 예견 제어

차량의 현가 장치의 설계에는 상충되는 제어 목적간의 타협 점을 찾는 일이 필요하다. 즉, 차량의 승차감을 위해서는 현가 상 질량의 가속도 성분의 크기를 감소시켜야 하며, 조정 안정성을 개선하기 위해선 타이어의 접지력과 관련된 타이어 변위를 줄여야 한다. 또한 이러한 제어 목적은 제한된 현가 장치 공간과 힘 작동기의 출력하에 성취되어야 한다.

따라서, 현가 장치의 제어기 설계는 다음과 같은 성능 계수를 최적화하는 문제로 정의 될 수 있다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T \left\{ \begin{bmatrix} \dot{z}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho_2 & 0 \\ 0 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_5 \\ x_7 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho_4 & 0 \\ 0 & \rho_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho_6 & 0 \\ 0 & \rho_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \right\} dt \quad (6)$$

성능 계수의 적분 항 중 세제 항은 조정성과 관련된 항으로 타이어가 선형 영역 내에 있다는 가정하에 타이어 변위의 2차 함수로 표현된다.

성능 계수는 $\dot{z}_c, \dot{\theta}_c$ 에 대한 운동 방정식을 고려하면, 다음과 같이 상태, 입력, 외란 벡터의 2차 함수의 형태로 바꿔 쓸 수 있다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T \left\{ x^T Q_1 x + 2x^T N u + u^T R u + 2x^T Q_2 w + w^T Q_3 w \right\} dt \quad (7)$$

따라서, 본 연구의 목적은 (4)식으로 묘사되는 시스템에 대해 성능 계수 (7)을 최소화하는 제어 입력을 구하는 것으로 요약된다.

(7)식의 성능 계수는 미지의 노면 입력 w 를 포함하고 있다. 따라서, 노면 입력에 대해 어떠한 가정을 하느냐에 따라 최적 해는 달라지게 된다. 노면 입력에 대한 가정에 따라 현가 장치 제어는 능동 제어, 예견 능동 제어로 나뉘게 되는데, 노면 입력을 0으로 가정하는 능동 제어와 달리 예견 능동 제어는 예견 센서나 앞 바퀴의 응답으로부터 추정된 노면 입력 정보를 제어력 계산에 사용한다.

본 연구에서는 노면 입력에 대해 다음과 같은 가정을 하고자 한다.

(가정 1) 추거 예견 시간 이내의 뒷바퀴 노면 입력

$$w_2(\sigma) \quad (\sigma \in [t, t + \tau])$$

는 추거 예견에 의해 알려져 있다.

(가정 2) 앞 바퀴 노면 입력과 추거 예견 시간 이후의 뒷바퀴 노면 입력은 0으로 가정한다.

$$w_1(\sigma) = w_2(\sigma + t) = 0: \quad (\sigma \geq t + \tau)$$

[2], [3] 등에 의하면, 노면 입력에 대한 정보가 존재할 경우 (7)식의 성능 계수를 최소화하는 제어 입력은 A_n, Q_n 이 다음과 같이 정의되고

$$A_n = A - BR^{-1}N^T, \quad Q_n = Q_1 - NR^{-1}N^T$$

Q_n 이 비음 한정(nonnegative definite)일 경우 정리 1로써 구할 수 있다.

(정리 1)

만일 (A_n, B) 가 안정 가능(stabilizable)하고, $(A_n, Q_n^{1/2})$ 이 감지 가능(detactable)할 경우 (4)식에 의해 묘사되는 시스템에 대한 성능 계수 (7)의 최적 해는 다음과 같이 주어진다.

$$u_0(t) = -R^{-1} \left[(N^T + B^T P)x(t) + B^T r(t) \right] \quad (8)$$

여기서, P 는 대수 리카티 방정식(ARE: Algebraic Riccati Equation)을 만족하는 비음 한정 해이며,

$$PA_n + A_n^T P - PBR^{-1}B^T P + Q_n = 0 \quad (9)$$

$$r(t) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \eta} (PE + Q_{12}) \begin{bmatrix} 0 \\ w_1(t + \eta - \tau) \end{bmatrix} d\eta \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서, 행렬 A_c 는

$$A_c = A - BR^{-1}(N^T + B^T P) = A_n - BR^{-1}B^T P$$

로써 모든 고유치의 실수 부분이 음의 값을 갖는 폐회로 시스템 행렬이다.

(8)식의 제어력을 살펴보면 최적 해는 LQR 상태 반환 제어 입력과 노면 입력에 대한 정보를 이용한 예견 제어 입력 $-R^{-1}B^T r(t)$ 두 부분으로 구성되어 있다. 예견 제어 입력은 앞 바퀴에서 측정된 노면 입력에 대해 예측되는 시스템의 응답을 상쇄시키기 위한, 예비적인 동작을 제공하는 피드 포워드 입력으로 해석될 수 있다.

제어에 사용된 모든 행렬은 시 불변(time invariant)이므로 LQR 제어에 사용되는 P 는 미리 계산할 수 있다. 한편, 피드 포워드 입력에 사용되는 $r(t)$ 는 매 스텝마다 새로운 적분 계산을 요구한다. 따라서, 예견 제어의 구현을 위해선 실시간 적분 계산에 해당하는 계산량의 증가를 감수해야 한다.

4. 미지 입력 관측기

(8)식에 의해 주어진 제어기를 구현하기 위해선 LQR 제어기에 필요한 상태 벡터에 대한 정보와 함께 피드 포워드 입력에 필요한 뒷바퀴 노면 입력에 대한 정보가 필요하다.

기존의 Luenberger 관측기와 Kalman-Bucy 필터는 출력 신호 이외에 모든 입력 신호를 알아야 한다는 점에서 본 연구에 적용하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Kalman-Bucy 필터를 기본 구조로 하는 미지 입력 관측기를 유도하고자 한다.

먼저 Kalman-Bucy 필터의 유도를 위해 (4), (5)식에 다음과 같이 시스템, 측정 잡음의 영향을 고려하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew + n_x, \quad y = Cx + Du + n_y \quad (11)$$

여기서, n_x, n_y 는 각각 시스템, 측정 잡음이다. 이러한 시스템에 대한 다음과 같은 구조를 가지는 미지 입력 관측기를 가정한다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= A\hat{x} + Bu + E\hat{w} + G(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du \end{aligned} \quad (12)$$

주어진 미지 입력 관측기의 유도를 위해선 다음의 4가지 조건이 필요하다.

(조건 1)

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E} \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} \mathcal{R}^{(n-p) \times p} \\ \mathcal{R}^{p \times p} \end{bmatrix}$$

(조건 2)

CE의 rank는 미지 입력 변수의 개수와 같아야 한다.

(조건 3)

$(A, E, C, 0)$ 의 트랜스미션 영점은 복소 평면 상의 우측 폐 공간에 존재하지 않는다.

(조건 4)

관측 행렬 C 를 네 블럭으로 분류할 경우

$$C = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} \mathfrak{R}^{(l-p) \times (l-p)} & \mathfrak{R}^{(l-p) \times p} \\ \mathfrak{R}^{p \times (n-p)} & \mathfrak{R}^{p \times p} \end{bmatrix}$$

\bar{C}_{12} 는 영 행렬이다.

조건 2,3,4는 미지 입력 관측기를 설계하기 위해 필요한 관측 행렬의 요건이다. 조건 2는 미지 입력의 추정을 위해선 각각의 미지 입력에 의해 직접 영향 받는 변수를 측정해야 함을 뜻하며, 조건 3은 미지 입력의 추정에 사용되는 역 시스템(inverse system)의 안정성을 보장하기 위한 조건이다. 마지막으로 조건 4는 조건 2에 의해 결정되는 출력 변수 이외의 출력 변수는 모두 미지 입력에 의해 직접 영향받지 않는 것으로 선택해야 함을 의미한다.

다음과 같은 행렬 T 를 가정하자.

$$T = \begin{bmatrix} E & Q \end{bmatrix}$$

여기서, 행렬 Q 는 행렬 T 를 비특이 행렬로 만드는 행렬이다. G 를 Kalamn-Bucy 필터의 이득 행렬이라고 할 때, 행렬 T 에 의해 변환된 행렬 $\bar{A}, \bar{G}, \bar{C}$ 는

$$\bar{A} = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} \mathfrak{R}^{p \times p} & \mathfrak{R}^{p \times (n-p)} \\ \mathfrak{R}^{(n-p) \times p} & \mathfrak{R}^{(n-p) \times (n-p)} \end{bmatrix}$$

$$\bar{G} = T^{-1}G = \begin{bmatrix} \bar{G}_1 \\ \bar{G}_2 \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} \mathfrak{R}^{p \times l} \\ \mathfrak{R}^{(n-p) \times l} \end{bmatrix}$$

$$\bar{C} = CT = \begin{bmatrix} \bar{C}_1 & \bar{C}_2 \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} \mathfrak{R}^{l \times p} & \mathfrak{R}^{l \times (n-p)} \end{bmatrix}$$

로 주어진다. 여기서, n 은 시스템의 차수, p 는 미지 입력의 개수, l 은 출력의 개수를 나타낸다.

이때, 미지 입력 관측기의 동력학은 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= TM_1T^{-1}\hat{x} + TM_2u + TM_3\frac{du}{dt} + TM_4\hat{y} + TM_5\frac{d\hat{y}}{dt} \\ \hat{w} &= E^* \begin{pmatrix} (TM_1T^{-1} - A)\hat{x} + (TM_2 - B)u + TM_3\frac{du}{dt} \\ + TM_4\hat{y} + TM_5\frac{d\hat{y}}{dt} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{G}_1\bar{C}_2(\bar{A}_{22} - \bar{A}_{21}\bar{G}_1\bar{C}_2 - \bar{G}_2(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)\bar{C}_2) \\ 0 & \bar{A}_{22} - \bar{A}_{21}\bar{G}_1\bar{C}_2 - \bar{G}_2(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)\bar{C}_2 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\bar{G}_1\bar{C}_2(\bar{A}_{21}\bar{B}_{n1} + \bar{B}_{n2} - \bar{G}_2\bar{C}_1\bar{B}_{n1}) \\ \bar{A}_{21}\bar{B}_{n1} + \bar{B}_{n2} - \bar{G}_2\bar{C}_1\bar{B}_{n1} \end{bmatrix}, \quad M_3 = \begin{bmatrix} \bar{B}_{n1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} -\bar{G}_1\bar{C}_2(\bar{A}_{21}\bar{G}_1 + \bar{G}_2(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)) \\ \bar{A}_{21}\bar{G}_1 + \bar{G}_2(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1) \end{bmatrix}, \quad M_5 = \begin{bmatrix} \bar{G}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{B}_{n1} \\ \bar{B}_{n2} \end{bmatrix} = T^{-1}(B - EE^*B) = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}^{(n-p) \times l} \\ \mathfrak{R}^{p \times l} \end{bmatrix}$$

$$\hat{y} = y - Du$$

한편, 시스템 및 측정 잡음이 다음을 만족하는 가우스 백색 잡음이라면,

$$E[n_x(t)n_x^T(t)] = N_x, \quad E[n_y(t)n_y^T(t)] = N_y, \quad E[n_x(t)n_y^T(t)] = 0$$

잡음의 영향을 최소화하는 관측기의 이득 행렬 G 는 다음과 같이 설정된다.

$$G = T \begin{bmatrix} \bar{G}_1 \\ \bar{G}_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} (\bar{C}_1)^* \\ (\hat{P}_{eq}C_{eq}^T + F_{eq}X_{eq})W_{eq}^* \end{bmatrix}$$

여기서,

$$0 = \bar{A}_{eq}\hat{P}_{eq} + \hat{P}_{eq}\bar{A}_{eq}^T - \hat{P}_{eq}C_{eq}^TW_{eq}^*C_{eq}\hat{P}_{eq} + F_{eq}\bar{V}_{eq}F_{eq}^T \quad (14)$$

$$\bar{A}_{eq} = A_{eq} - F_{eq}X_{eq}W_{eq}^*C_{eq}^*, \quad \bar{V}_{eq} = V_{eq} - X_{eq}W_{eq}^*X_{eq}^T$$

$$A_{eq} = \bar{A}_{22} - \bar{A}_{21}\bar{G}_1\bar{C}_2, \quad C_{eq} = (I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)\bar{C}_2$$

$$F_{eq} = [LT^{-1} \quad \bar{A}_{21}\bar{G}_1], \quad V_{eq} = \begin{bmatrix} N_x & 0 \\ 0 & N_y \end{bmatrix}$$

$$X_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ -N_y(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)^T \end{bmatrix}, \quad W_{eq} = (I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)N_x(I_l - \bar{C}_1\bar{G}_1)^T$$

(13)식에 의해 추정되는 상태, 외란 벡터는 측정 변수에 포함된 잡음 이외에 측정 변수의 미분에 의한 미분 오차에 의해 영향을 받는다. 이러한 미분 오차의 영향은 상태 벡터의 추정에 있어서는 자체의 동력학에 의해 자체 필터링 되지만, 외란 벡터의 추정에는 필터링 없이 바로 전달된다. 따라서, 제안된 미지 입력 관측기에 의해 추정된 외란 벡터를 예견 제어에 사용하기 위해선 저역 통과 필터를 사용하여 필터링 시켜주어야 한다.

5. 모의 실험

앞서 소개된 측거 예견 제어기와 미지 입력 관측기를 2 절에 소개된 차량 모델에 적용해 보았다. 모의 실험에 사용된 계수는 [2]에 주어진 값을 사용했다.

한편, LQR 제어기의 설계를 위해 다음의 가중치를 사용하였다.

$$\rho_1 = 2, \quad \rho_2 = 5000, \quad \rho_3 = 1000, \quad \rho_4 = 1000$$

$$\rho_5 = 100, \quad \rho_6 = \rho_7 = 0$$

미지 입력 관측기 설계에 필요한 시스템, 측정 잡음의 상호 분산 행렬은 다음과 같이 가정하였다.

$$N_x = \rho I_n, \quad N_y = I_n \quad ; \quad \rho = 1.0e3$$

시스템 잡음의 상호 분산 행렬을 측정 잡음의 것에 비해 크게 잡은 이유는 미지 입력 관측기에 있어서 잡음의 영향이 저주파 대역에서 두드러졌기 때문이다.

제어기 성능 평가를 위한 노면 입력으로 그림 2에 나타난 요철을 사용하였다. 이를 통하여 제안된 차량의 결정론적인 노면 입력에 대한 응답 특성을 파악할 수 있다. 그림 3에는 그림 2의 노면 변위의 1차 미분에 해당하는 노면 입력과 함께 미지 입력 관측기를 이용한 추정 신호가 표시되어 있다. 비교를 통해 추정된 노면 입력은 저역 통과 필터의 사용에 의해 시간 지연을 가지게 되었지만, 우려한 잡음의 영향은 줄어든 것을 볼 수 있다

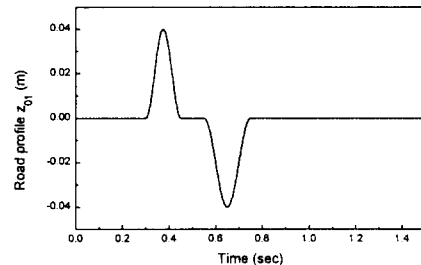


그림 2 노면 변위

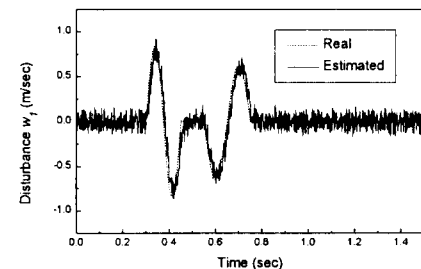
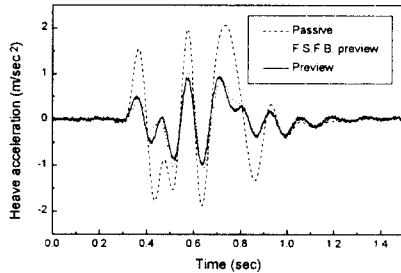


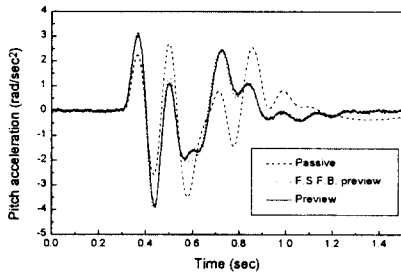
그림 3 추정된 노면 입력

그림 4에는 수동 현가 제어기를 사용한 경우와 측거 예견 제어기를 사용한 경우의 승차감에 관련된 응답 특성이 나타나 있다. 그림에서 Full State Feedback preview, preview는 각각 모든 입력 및 상태 벡터를 아는 경우의 예견 제어와 부분적인 상태

벡터 정보만을 알 경우의 예견 제어의 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 미지 입력 관측기를 이용한 예견 제어의 최대 성능을 파악하기 위해 모든 상태 변수를 측정한다고 가정하였다. 두 예견 제어기의 응답 특성의 비교를 통해 미지 입력 관측기를 사용한 경우의 응답이 측정 잡음의 영향으로 고 주파수 성분을 포함하고 있지만, F.S.F.B. 예견 제어기를 이용한 경우와 비슷한 성능을 보인다는 것을 알 수 있다.



(a) heave 가속도



(b) pitch 가속도

그림 4. 노면 입력에 대한 승차감 특성

한편, 그림 5에는 축거 예견 정보에 의한 피드 포워드 입력의 영향이 반영된 뒷쪽의 힘 작동기 출력의 응답 곡선이 나타나 있다. 앞선 결과와 마찬가지로 응답이 고 주파수 성분을 가지지만, 거의 동일한 크기의 출력이 사용된다.

이상에서 보듯 제안된 미지 입력 관측기를 사용한 축거 예견 제어기는 미지 입력 정보를 가진 예견 제어기와 유사한 성능을 보임을 알 수 있다.

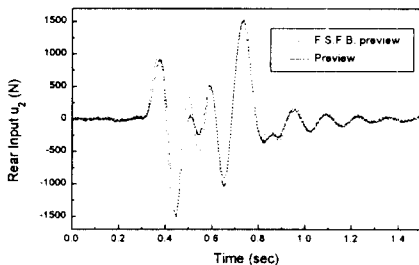


그림 5 뒷쪽의 힘 작동기 출력

6. 결론

축거 예견 제어기를 위한 미지 입력 관측기와 이를 위한 이득 행렬 결정법이 제시되었다. 미지 입력 관측기의 이득 행렬은 시스템 및 측정 잡음의 영향을 최소화할 목적으로 설정된다. 제안된 관측기는 노면 정보를 필요하지 않으며, 추가 출력법에 비해 완화된 관측 조건을 가진다. 미지 입력의 추정 값은 출력 변수의 미분 오차로 인해 고 주파수의 잡음을 포함하지만, 이는 저역 통과 필터의 사용으로 제거 가능하다.

1/2 차량 모델의 모의 실험을 통해 미지 입력 관측기를 사용한 축거 예견 제어기의 성능이 미지 입력 정보를 가진 예견 제어기와 유사한 성능을 가짐을 증명하였다.

참고문헌

- [1] E.K. Bender, "Optimum Linear Preview Control with Application to Vehicle Suspension," ASME Journal of Basic Engineering. Ser. D. Vol. 90, No. 2, 1968, pp. 213-221
- [2] A.Hac and I. Youn, "Optimal Design of Active and Semi-Active Suspensions Including Time Delays and Preview," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 115, October 1993, pp. 498-508
- [3] T. Yoshimura and K. Edokoro, "An Active Suspension Model for Rail/Vehicle Systems with Preview and Stochastic Optimal Control," Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, No.3, pp. 507-519
- [4] R. Huisman, F.F. Veldpaus, J.G.A.M. van Heck and J.J. Kok, "Application of Preview controlled Active Suspension to a (Non)linear 2-D Truck Model," Proceedings of AVEC'94, October 1994, pp. 293-298
- [5] Y. Park and J.L. Stein, "Steady State Optimal State and Input Observer for Discrete Stochastic Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 111, No. 2. 1989, pp. 121-127
- [6] 진재현, "미지 입력 관측기의 설계와 비행 제어 시스템의 고장 진단에의 응용," 박사학위 중간 발표 논문, 1994