

# 반능동 현가장치의 성능 향상을 위한 견실 $H_\infty$ 제어기 설계

정승권\*, 김인수\*, 이종년\*\*, 이만형\*\*\*

## Robust $H_\infty$ Controller Design for Performance Improvement of Semi-Active Suspension System

Seung Gweon Jeong\*, In Soo Kim\*, Jong Nyun Lee\*\*, Man Hyung Lee\*\*\*

### Abstract

In this paper, a robust  $H_\infty$  controller for semi-active suspension system is proposed. For the improvement of ride quality, the robust  $H_\infty$  controller is designed to satisfy robust stability and road disturbance attenuation using an  $H_\infty$  control design procedure. The performances of the designed controller for some road conditions are evaluated by computer simulation and finally these simulation results show the usefulness and applicability of the proposed robust  $H_\infty$  controller.

**Key Words :** Semi-active suspension(반능동 현가장치), quarter car(1/4 차량),  $H_\infty$  control( $H_\infty$  제어)

### 1. 서론

차량은 불규칙한 노면을 주행할 때 심한 진동을 받게 되며, 이는 탑승자의 승차감에 매우 큰 영향을 미친다. 이러한 진동을 억제하기 위하여 사용되고 있는 기계적 장치가 현가장치(suspension)이다. 즉, 현가장치의 중요한 기능은 노면의 불규칙한 상태에 의한 차량의 진동을 완화 및 흡수하여 승차감을 향상시키는 것이고, 여러 형태의 노면에서 발생하는 노면반력으로부터 차량의 안정한 운동성을 유지하는 것이다. 현가장치는 그 작동원리에 따라 스프링과 감쇠기로 구성된 수동(passive) 현가장치, 가변감쇠기

를 이용하는 반능동(semi-active) 현가장치, 유·공압 및 전기적 힘 구동기(actuator)로 구성되어 있는 능동(active) 현가장치로 구분되어진다.<sup>(1-3)</sup> 수동 현가장치는 가격이 저렴하고 구조가 간단하지만 고정된 감쇠기로부터 현가장치의 상대적인 속도에 비례하는 힘을 발생시키므로 불규칙한 노면으로부터 발생하는 진동억제에는 그 한계가 있으며, 따라서 외부 외란에 적극적으로 억제성능을 만족하는 반능동 또는 능동 현가장치 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 반능동 현가장치는 능동 현가장치에 비해 그 구조가 간단하고 스프링상질량(sprung mass)과 스프링하질량(unsprung mass)사이의 가변감

\* 부산대학교 지능기계공학과  
\*\* 동서대학교 정보통신공학부  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부

쇠기로부터 스프링상질량의 상대속도에 따른 감쇠력이 조절 가능하므로 불규칙한 노면외란에 대한 승차감향상에 있어서 우수한 성능을 가진다. 본 논문의 목적은 1/4 차량 현가장치 모델을 이용하여 노면외란에도 견실한 성능을 만족하는 반능동 현가장치를 위한 전실  $H_\infty$  제어를 설계한다.  $H_\infty$  제어<sup>(4)</sup>는 플랜트의 모델링오차, 외란, 주위 환경변화 등으로 야기되는 불확실성을 평가함수에 포함 시킴으로써 정량적으로 불확실성을 고려하는 제어기 설계법이다. 따라서 본 논문에서는 이러한  $H_\infty$  제어기법의 특성을 이용하여 차량의 승차감향상을 위하여 반능동 현가장치가 견실한 성능을 가지도록 불규칙한 노면외란에 대한 스프링상질량의 수직 가속도의 주파수역 평가함수를 설정하고, 이를 바탕으로 노면외란 억제성능을 만족하는 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 여러 가지 불규칙한 노면조건에 대한 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였으며, 그 결과로부터 본 논문에서 제안한 반능동 현가장치의 전실  $H_\infty$  제어기의 유용성과 응용 가능성을 확인하였다.

## 2. 반능동 현가장치 모델링

Fig. 1은 본 논문에서 고려한 반능동 현가장치의 1/4 차량 모델<sup>(5-7)</sup>으로써, 그림과 같이 1/4 차량 모델은 스프링상질량과 스프링하질량의 2자유도 모델로 주어진다. Fig. 1에서 2자유도 현가장치의 운동방정식은 식 (1)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s (z_s - z_u) &= f_a \\ m_u \ddot{z}_u + c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_s (z_u - z_s) - k_t (z_u - z_r) &= -f_a \end{aligned} \quad (1)$$

1/4 차량의 선형모델식을 구하기 위하여 식 (1)에서 다음과 같이 상태변수를 정의한다.

$$\begin{aligned} x_1 &= z_s - z_u : \text{현가장치 변위(suspension deflection)} \\ x_2 &= \dot{z}_s : \text{스프링상질량의 절대속도} \\ x_3 &= z_u - z_r : \text{타이어 변위(tire deflection)} \\ x_4 &= \dot{z}_u : \text{스프링하질량의 절대속도} \end{aligned}$$

위에서 정의된 상태변수를 이용하여 식 (1)의 운동방정식으로부터 식 (2)와 같은 선형 상태공간모델식을 유도할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (2)$$

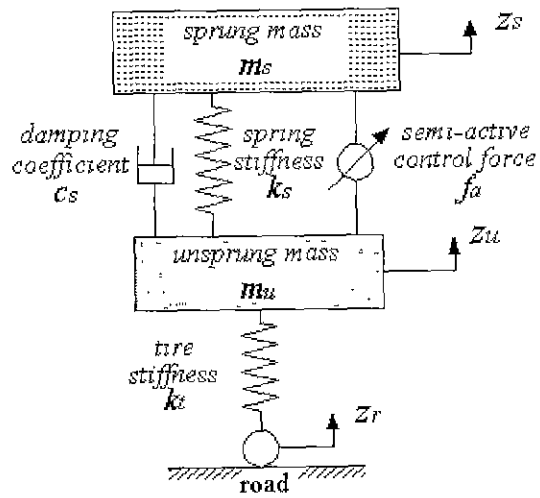


Fig.1 Semi-active suspension model

여기서 입력  $u(t)$ 는 반능동 제어입력  $f_a$ , 외란  $w(t)$ 는 노면 굴곡의 변화를  $\dot{z}_r$ 으로 주어지며, 각 행렬  $A, B, E$ 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m_s}{m_u} \\ \frac{k_t}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & 0 & -\frac{c_s}{m_u} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_s} & 0 & -\frac{1}{m_s} \end{bmatrix}^T, E = [0 \ 0 \ -1 \ 0]^T$$

## 3. LMI에 기초한 $H_\infty$ 제어

Doyle 등<sup>(8)</sup>이 제안한  $H_\infty$  제어 해법은 매우 해석적이며, 수치적으로도 안정하여 널리 알려져 있다. 여기서  $H_\infty$  제어문제의 해는 두 개의 대수 Riccati 방정식으로부터 구해지며, 중심해(central controller)와 자유 파라미터  $Q$ 와의 LFT(Linear Fractional Transformation) 형태로 주어진다. 그러나 Doyle 등이 제안한 해법에서는 단지 제어입력에서 제어량까지의 전달함수 그리고 외부입력에서 관측출력까지의 전달함수가 무한대에서 또는 러축상에서 불변영점을 가지지 않는 플랜트에만 적용할 수 있다. 그리고,  $Q$ 와 제어기 또는  $Q$ 와 제어기를 포함하는 폐루프계 특성 사이에는 명확한 관련성이 없기 때문에 설계 목적에 맞는 적절한  $H_\infty$  제어해법이 주어지지 않고 있다. 결과적으로 다양한  $H_\infty$  제어기의 구현은 실제로는 매우 힘들며, 시스템

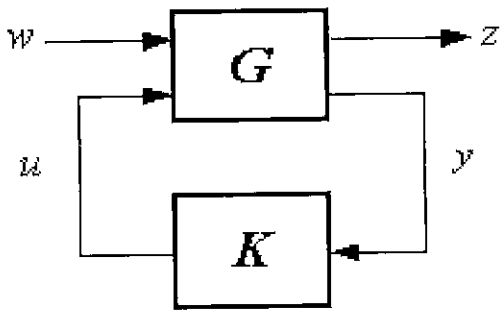


Fig. 2  $H_\infty$  control problem

에의 적용에 있어서 비록 불필요한 성질을 가지더라도 중심해에 의존할 수밖에 없다. 이러한 Doyle 등의 해법의 대안으로써 Gahinet<sup>9)</sup>은 LMI(Linear Matrix Inequality)에 기초한  $H_\infty$  제어기 설계법을 제시하였다. 특히, LMI에 기초한  $H_\infty$  제어기 해법에서는 유계실정리(bounded real lemma)로부터  $H_\infty$ -노름 제한조건이 대수 Riccati 부등식(또는 LMI)으로 기술되며, 이 부등식의 해 집합은 축소된 차수의 제어기를 포함하여 모든 준-최적  $H_\infty$  제어기를 구성하는 데 이용된다.

Fig. 2에서 외란  $w$ 와 제어입력  $u$ 를 제어량  $z$ 와 관측출력  $y$ 로 사상시키는 프로퍼(proper)한 일반화 플랜트  $G$ 를 식 (3)과 같이 나타내도록 한다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 때,  $G$ 와 주어진 설계사양  $\gamma$ 에 대한  $H_\infty$  제어문제는 다음을 만족하는 제어기  $K$ 를 구하는 문제로 정의된다.

(1) 폐루프 시스템이 내부적으로 안정하다.

(2)  $\|F_{zw}\|_\infty < \gamma$

여기서,  $F_{zw}$ 는  $w$ 에서  $z$ 까지의 폐루프 전달함수로서 식 (4)와 같다.

$$F_{zw}(s) = G_{11}(s) + G_{12}(s)K(s)(I - G_{22}(s))^{-1}G_{21}(s) \quad (4)$$

식 (3)과 같이 주어진 일반화 플랜트  $G$ 에 대한  $H_\infty$  제어문제의 해가 존재하기 위해서는  $G$ 가 다음의 두 가지 조건을 만족해야 한다.

A1)  $(A, B_2)$ 가 가안정이고,  $(A, C_2)$ 가 가점출이다.

A2)  $D_{22} = 0$

가정 A1)과 A2)를 만족하는 일반화 플랜트  $G$ 에 대하여,  $N_R$ 과  $N_S$ 를 각각  $(B_2^T, D_{12}^T)$ 와  $(C_2, D_{21})$ 의 영 공간에 속하는 기저벡터라 두면, 설계사양  $\gamma$ 에 대한 준-최적  $H_\infty$  제어문제는 다음의 두 LMI 시스템을 만족하는 대칭행렬  $R, S$ 가 존재하기만 하면 해를 가진다.

$$\begin{pmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} AR + RA^T & RC_1^T & B_1 \\ C_1 R & -\gamma I & D_{11} \\ B_1^T & D_{11}^T & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} A^T S + SA & SB_1 & C_1^T \\ B_1^T S & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 & D_{11} & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} R & I \\ I & S \end{pmatrix} > 0 \quad (7)$$

식 (5)-(7)의 임의의 해  $R, S$ 에 대하여, 준-최적  $H_\infty$  제어기  $K(s) = D_K + C_K(sI - A_K)B_K$ 는 다음과 같은 순서로 계산된다.

STEP 1 :  $\sigma_{\max}(D_{11} + D_{12}D_oD_{21}) < \gamma$ 를 만족하는 임의의 행렬  $D_o$ 와 함께 식 (8)로부터  $D_K$ 를 구한다.

$$D_K = (D_{12}^+ D_{12}) D_o (D_{21} D_{21}^+) \quad (8)$$

STEP 2 : 다음과 같이 주어지는 두 선형 행렬방정식의 최소자승해  $(\Theta_B^*)^T$ 와  $(\Theta_C^*)^T$ 를 구한다.

$$\begin{pmatrix} 0 & D_{21} & 0 \\ D_{21}^T & -\gamma I & D_{cl}^T \\ 0 & D_{cl} & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_{B1} \\ * \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} C_2 \\ B_1^T S \\ C_1 + D_{12} D_K C_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & D_{12}^T \\ 0 & -\gamma I & D_{cl}^T \\ D_{12} & D_{cl} & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_{C1} \\ * \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} B_2^T \\ (B_1 + B_2 D_K D_{21})^T \\ C_1 R \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $D_{cl} = D_1 + D_{12} D_K D_{21}$ 이다.

STEP 3 :  $\pi_{12} = I - D_{12}^+ D_{12}$ 와  $\pi_{21} = I - D_{21} D_{21}^-$ 로 표기하자.  $\pi_{21} C_2 = 0$ 이면,  $\Theta_{B2} = 0$ 으로 두고, 그렇지 않은 경우,  $\Theta_{B2}$ 는 식 (11)로부터 계산된다.

$$\Psi(\Theta_{B1}) + C_2^T \pi_{21} \Theta_{B2} + \Theta_{B2}^T \pi_{21} C_2 < 0 \quad (11)$$

그리고,  $\pi_{12} B_2^T = 0$  이면,  $\Theta_{C2} = 0$  으로 두고, 그렇지 않은 경우  $\Theta_{C2}$  는 식 (12)로부터 계산된다.

$$\Pi(\Theta_{C1}) + B_2^T \pi_{12} \Theta_{C2} + \Theta_{C2}^T \pi_{12} B_2^T < 0 \quad (12)$$

여기서,  $\Psi(\Theta_{B1})$  와  $\Pi(\Theta_{C1})$  는 각각 아래의 식으로부터 계산된다.

$$\Psi(\Theta_{B1}) = A^T S + S A + \Theta_{B1}^T C_1 + C_1^T \Theta_{B1} + \begin{bmatrix} B_1^T S + D_1^T \Theta_{B1} \\ C_1 + D_{12} D_k C_2 \end{bmatrix}^T \Delta^{-1} \begin{bmatrix} B_1^T S + D_1^T \Theta_{B1} \\ C_1 + D_{12} D_k C_2 \end{bmatrix}$$

$$\Pi(\Theta_{C1}) = A R + R A^T + B_2 \Theta_{C1} + \Theta_{C1}^T B_2^T + \begin{bmatrix} (B_1 + B_2 D_k^T D_{21})^T \\ C_1 R + D_{12}^T \Theta_{C1} \end{bmatrix}^T \Delta^{-1} \begin{bmatrix} (B_1 + B_2 D_k^T D_{21})^T \\ C_1 R + D_{12}^T \Theta_{C1} \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \gamma I & -D_1^T \\ -D_1 & \gamma I \end{bmatrix} > 0$$

STEP 4 :  $I - R S$  를 가역인 두 행렬  $M, N$  에 대하여  $M N^T$  로 분해하고,  $\Theta_C = \Theta_{C1} + \pi_{12} \Theta_{C2}$  와  $\Theta_B = \Theta_{B1} + \pi_{21} \Theta_{B2}$  로 두면,  $A_K, B_K, C_K$  는 다음 식들로부터 계산된다.

$$N B_K = -S B_2 D_K + \Theta_B^T, \quad C_K M^T = -D_K C_2 R + \Theta_C \quad (13)$$

$$-N A_K M^T = S B_2 \Theta_C + \Theta_B^T C_2 R + S(A - B_2 D_k C_2) R + (A + B_2 D_k C_2)^T + \begin{bmatrix} (S B_2 + \Theta_B D_{21})^T \\ C_1 + D_{12} D_k C_2 \end{bmatrix}^T \Delta^{-1} \begin{bmatrix} (B_1 + B_2 D_k^T D_{21})^T \\ C_1 R + D_{12}^T \Theta_C \end{bmatrix} \quad (14)$$

#### 4. 반능동 현가장치의 $H_\infty$ 제어기 설계

노면의 불규칙한 변화에 대한 승차감 향상을 위하여 노면의 입력을 외란으로 설정하고, 외란억제 성능을 만족하는 견실한 제어기를 설계하였다.

##### 4.1 문제의 정식화

일반적으로 승차감에 직접적인 영향을 미치는 성분은 스프링상질량의 수직 가속도 성분이므로, 승차감향상을 위해서는 수직 가속도에 대한 노면 외란억제 성능을 만족하는 견실한 제어기 설계가 요구된다. 이러한 성능을 만족하는 반능동 현가장치의  $H_\infty$  제어기를 설계하기 위하여

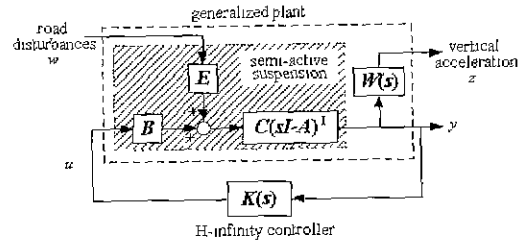


Fig. 3 Generalized plant for  $H_\infty$  controller design

Fig. 3과 같이 일반화플랜트를 구성하였다.

Fig. 3에서  $K$  는 설계해야 할  $H_\infty$  제어기,  $W$  는 외란억제를 위한 가중함수, 외란  $w$  는 노면 굴곡의 변화율( $\dot{z}$ ), 입력  $u$  는 반능동 제어력, 관측출력  $y$  는 스프링상질량의 수직 가속도를 가리키며, 노면 외란이 스프링상질량의 수직 가속도에 미치는 영향을 억제하도록 하기 위하여 제어량  $z$  는 스프링상질량의 수직 가속도로 선정하였다. 1/4 차량 모델의 각 파라미터 값은 Table 1과 같이 주어진다.

가중함수  $W$  는 Fig. 4와 같이 승차감에 영향을 미치는 1/4 차량 모델의 공진점인 1.0 Hz 부근에서 개인값이 크도록 식 (15)와 같이 안정한 유리함수로 선정하였다.

Table 1 System parameters of 1/4 car model

Parameters	Symbol	Initial value
Sprung mass	$m_s$	453 kg
Unsprung mass	$m_u$	71 kg
Damping coefficient	$c_s$	1950 N sec/m
Coil spring stiffness	$k_s$	17658 N/m
Tire stiffness	$k_t$	183887 N/m

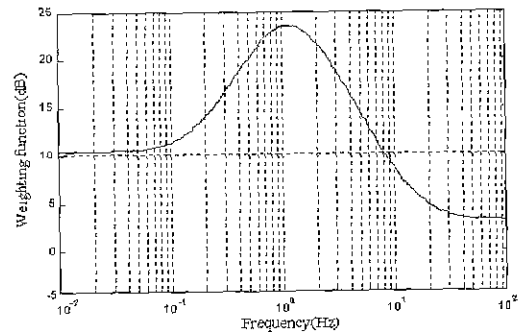


Fig. 4 Weighting function  $W(s)$

$$W(s) = \frac{1.5s^2 + 152.9s + 84.9}{s^2 + 10.16s + 25.56} \quad (15)$$

#### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된  $H_\infty$  제어기는 가중함수의 차수를 포함하여 8차로 주어지며, 이를 상태공간모델식으로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_K x + B_K u \\ y &= C_K x + D_K u \end{aligned} \quad (16)$$

$$A_K = \begin{bmatrix} 2373.40 & 106.27 & 2192.50 & -405.72 & 451.72 & 252.11 & -74.46 & 2.05 \\ 0.446 & -415.92 & 16.51 & 2.00 & 3.15 & 0.320 & 2.25 & -416.25 \\ -95.80 & 13.58 & -91.83 & 73.26 & 52.60 & 0.370 & 58.83 & 17.93 \\ -2192.08 & -94.56 & -1978.07 & 189.83 & -321.64 & -217.50 & -148.07 & -0.579 \\ -18847.8 & -816.39 & -17175.0 & 2415.68 & -2938.62 & -1898.56 & -337.71 & -0.190 \\ -8242.93 & -335.90 & -7061.66 & 664.00 & 1487.82 & -428.77 & -791.53 & -0.406 \\ -454.03 & -19.987 & -412.66 & 57.53 & -63.91 & -44.73 & -10.31 & -0.377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_K = [-83.510 \quad -0.957 \quad 3364 \quad 75.675 \quad 655.629 \quad 270.449 \quad 15.755 \quad 1.00]^T$$

$$C_K = [-5140.31 \quad -680.78 \quad -14174.8 \quad 45173.6 \quad -6250.97 \quad -1597.89 \quad 48059.6 \quad 0]$$

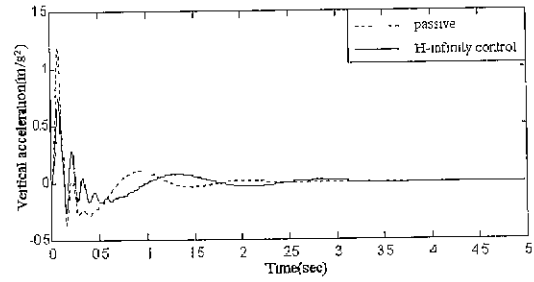
$$D_K = 0$$

우선, 설계된 제어기로부터 차량이 높이 0.15m, 너비 1m인 둔덕을 10m/s의 속도로 통과할 때의 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5(a)에서 점선은 수동 현가장치, 실선은  $H_\infty$  제어에 의한 반능동 현가장치의 스프링상절량 수직 가속도를 각각 나타낸다. 0.1초에서 수동 현가장치의 최대 수직 가속도 1.2m/s<sup>2</sup>에 비해  $H_\infty$  제어에 의한 반능동 현가장치에서의 최대 수직 가속도가 0.7m/s<sup>2</sup>로 줄어들었으며, 전반적으로 수동 현가장치에 비해 개선된 성능을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서는  $H_\infty$  제어시스템에서의 반능동 제어력을 나타내었다.

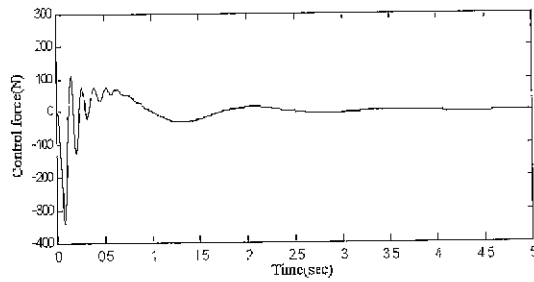
다음으로 차량이 임의의 불규칙한 도로노면을 주행할 때의 시뮬레이션을 통하여 차량의 승차감 해석 및  $H_\infty$  제어기의 전실한 성능을 평가하였다. 불규칙한 도로노면은 다음과 같은 상태공간모델식<sup>(10)</sup>으로부터 생성하였다.

$$\dot{\eta} = A_\eta \eta + B_\eta \xi \quad (17)$$

여기서  $A_\eta = -av$ ,  $B_\eta = 1$ 이며, 입력  $\xi$ 는 백색잡음, 초기 상태는  $\eta_0 = 2\sigma^2 av$ 로 주어진다. 그리고  $v$ 는 차량의 속도를 가리킨다.



(a) Vertical acceleration



(b) Semi-active control force

Fig. 5 Time responses of semi-active suspension system passing through a bumper

Table 2 Parameters of road model

Road	Asphalt	Paved road
$\alpha(1/m)$	0.15	0.45
$\sigma^2(mm^2)$	9	300

시뮬레이션은 아스팔트(asphalt)와 포장도로(paved road)의 거친 노면상태와 차량속도 20m/s를 기준으로 수행하였다. 각각의 노면 상태에 대한 식 (17)의 파라미터 값들은 Table 2와 같다.

Fig. 6(a)과 Fig. 7(a)에서는 각각 아스팔트와 포장도로의 거친 노면을 차량이 통과하였을 때, 스프링상절량 수직 가속도의 시간역 응답을 나타내었다. 수동 현가장치에 비해 불규칙한 노면외란에 대한 억제성능을 만족하도록 설계된  $H_\infty$  제어기에 대한 수직 가속도가 전반적으로 개선된 응답성능을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)는 각 수직 가속도 응답에 대한 반능동 제어력을 나타내었다.

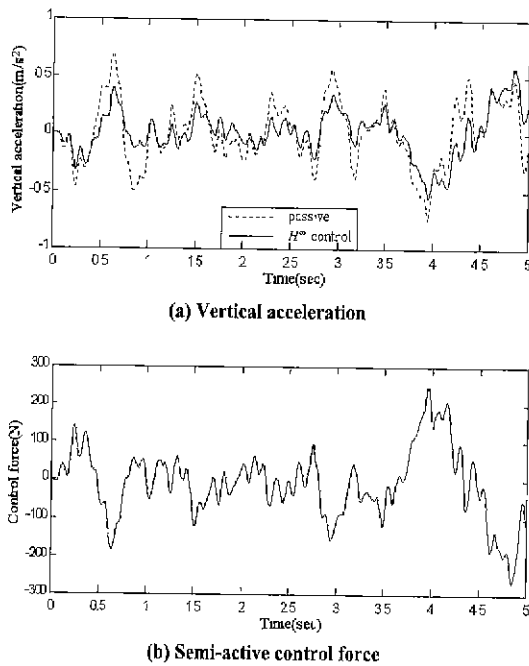


Fig. 6 Time response of semi-active suspension system passing through poor road

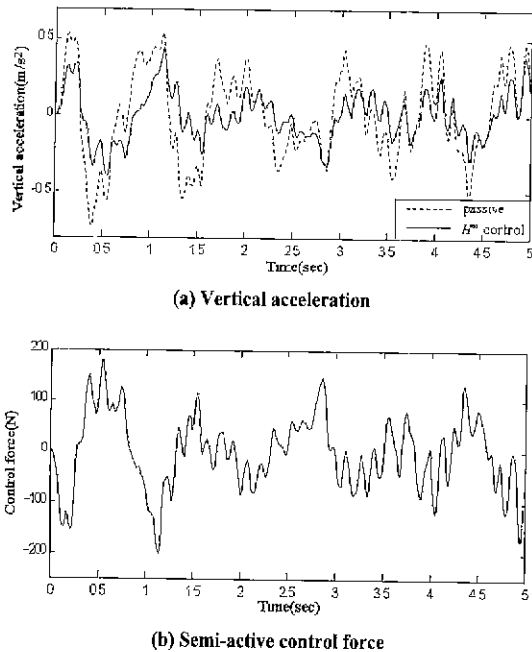


Fig. 7 Time response of semi-active suspension system passing through poor road

## 5. 결 론

본 논문에서는 1/4 차량으로 모델링한 반능동 현가장치의 건설  $H_{\infty}$  제어를 설계하였다. 불규칙한 노면을 통과하는 차량의 승차감향상을 위하여 노면외란이 스프링상질량의 수직 가속도에 미치는 영향을 억제하기 위하여  $H_{\infty}$  제어기법을 이용하여 외란억제 성능을 만족하는 건설  $H_{\infty}$  제어를 설계하였다. 설계된 제어기는 둔덕 및 불규칙한 노면외란의 스프링상질량 수직 가속도에 대한 영향을 최소화하여 개선된 외란억제 성능을 만족하였으며, 본 논문에서 제안한 건설  $H_{\infty}$  제어기의 응용가능성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 허승진, "자동차의 능동형 차시시스템 개발동향," 제어·자동화·시스템공학회, 제2권, 제2호, pp. 57~65, 1996.
- (2) 김호용, 자동차 현가장치, 에드텍, 1997.
- (3) F. H. Besinger, D. Cebon, and D. J. Cole, "Force Control of a Semi-Active Damper," Vehicle System Dynamics, Vol. 24, pp. 695~723, 1995.
- (4) 多美 勉,  $H_{\infty}$  制御, 昭晃堂, 1994.
- (5) 이경수, "반능동 현가시스템," 대한기계학회지, 제 33권, 제10호, pp. 902~911, 1993.
- (6) K. J. Hedrick, R. Rajamani, and K. Yi, "Observer Design for Electronic Suspension applications," Vehicle System Dynamics, Vol. 23, pp. 413~440, 1994.
- (7) 박호, 전의식, 노병욱, "승차감향상을 위한 자동차 현가장치의 능동제어시스템," 한국공작기계기술학회지, 제7권, 제6호, pp. 102~109, 1998.
- (8) J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis, "State-Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_{\infty}$  Control Problems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 8, pp. 831~847, 1989.
- (9) P. Gahinet, "Explicit Controller Formulas for LMI-based  $H_{\infty}$  Synthesis," Automatica, Vol. 32, No. 7, pp. 107~1014, 1996.
- (10) 광병학, "강인한 능동형 현가 장치 제어기 설계에 관한 연구," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1993.