

능동 현가계의 합성 제어에 관한 연구

°김효준**, 박혁성**, 양현석*, 박영필*

A Study of Hybrid Control of Active Suspension System

(Hyo-Jun Kim, Hyuk-Sung Park, Hyun-Seok Yang, Young-Pil Park)

Abstract

The suspension system plays an important role in vehicle performance. To improve suspension characteristics related to riding comfort and handling stability simultaneously, active suspension system is developed. In this study, a hybrid control scheme is proposed, the idea of which is that the sliding mode control is applied to nonlinear hydraulic system and the skyhook control is applied for controlling the motion of the suspension system. The performance of the proposed control method is evaluated by simulation and experiment of a half car active suspension system.

1. 서론

차량의 현가계는 승차감 향상을 위한 진동 절연, 차체의 자세 유지, 조종 안정성을 위한 적절한 노면 접촉 유지 등의 기능을 하며 이러한 성능들을 향상시키기 위해서는 서로 연관되는 변수들에 대한 적절한 고려가 필요하다.

그러나 승차감과 조종 안정성이라는 두 성능 요소는 서로 상충되어 스프링과 감쇠기로 구성된 기존의 수동 현가계만으로는 이러한 요구들을 모두 만족시킬 수 없으므로 이러한 수동 현가계의 한계를 극복하기 위하여 능동형, 반 능동형 등의 전자 제어 현가계가 도입되어 실용화되어 가고 있으며, 이와 관련하여 여러 가지 제어 이론들을 적용한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{[1][2][3][4]}

그러나 이러한 적용에 있어서 현가계 자체에 대한 제어 알고리즘의 개발뿐 아니라 실제적인 제어력을 발생시키는 제어용 유압계의 특성을 함께 고려해야만 보다 효율적인 능동 제어 시스템의 구현이 가능하다.^[5]

유압계의 파라미터들은 온도와 압력 변화에 따른 작동유의 물리적 성질 변화, 사용에 따른 마모에 의한 누유, 릴리프 밸브에 의한 공급압력 저하, 유압 배관에서 감압 효과 등으로 인하여 변동하게 된다.

따라서 이러한 파라미터 변동을 고려할 수 있는 강건한 제어기의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 차량 현가계에는 제어기 구조가 간단하며 효율적인 스카이크 제어 이론을 적용하고 유압계에는 능동 제어 신호를 유압계가 추종할 수 있도록 동특성을 고려한 슬라이딩 모드 제어를 적용하는 합성제어를 능동 제어 시스템의 구현에 적용한다.

합성제어기를 차체의 히브 및 롤 거동을 모사할 수 있는 1/2 차량의 현가계에 적용하였다.

2. 능동 현가계의 모델링

2.1 1/2 차량 능동 현가계

2.1.1 운동 방정식

4 자유도 진동계로 모델링한 1/2 차량 능동 현가계에 대한 수학적 모델을 Fig. 1에 도시하였으며 스프링 상질량 및 스프링 하 질량의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_s \ddot{Z}_s + R_s^T K_s (R_s Z_s - R_u Z_u) + R_s^T C_s (R_s \dot{Z}_s - R_u \dot{Z}_u) = R_s^T f_a \quad (1a)$$

$$M_u \ddot{Z}_u - R_u^T K_s (R_u Z_u - R_s Z_s) + R_u^T K_T R_u Z_u - R_u^T K_T Z_r + R_u^T C_s (R_s \dot{Z}_s - R_u \dot{Z}_u) = -R_u^T f_a \quad (1b)$$

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과 대학원

여기서 $M_s = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & I_s \end{bmatrix}, K_s = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix},$

$C_s = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}, f_a = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$

$M_u = \begin{bmatrix} m_u & 0 \\ 0 & I_u \end{bmatrix}, K_T = \begin{bmatrix} k_t & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix}$

$Z_{si} = R_s Z_s, Z_{ui} = R_u Z_u$

$Z_{s1} = \begin{bmatrix} z_{s1} \\ z_{s2} \end{bmatrix}, Z_s = \begin{bmatrix} z_s \\ \phi_s \end{bmatrix}, R_s = \begin{bmatrix} 1 & -l_1 \\ 1 & l_2 \end{bmatrix}$

$Z_{u1} = \begin{bmatrix} z_{u1} \\ z_{u2} \end{bmatrix}, Z_u = \begin{bmatrix} z_u \\ \phi_u \end{bmatrix}, R_u = \begin{bmatrix} 1 & -l_3 \\ 1 & l_4 \end{bmatrix}$

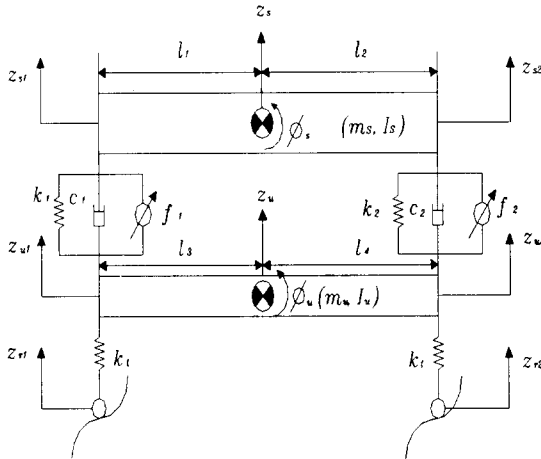


Fig. 1. Mathematical Model of Half Car Active Suspension System

2.1.2 상태 방정식

1/2 차량 능동 현가계에 대한 상태 벡터를 다음과 같이 선정하였다.

$$\{X\} = \{ \dot{z}_s, \phi_s, (z_{s1} - z_{u1}), (z_{s2} - z_{u2}), \dot{z}_u, \phi_u, (z_{u1} - z_{r1}), (z_{u2} - z_{r2}) \}^T$$

상태방정식은 식(2)와 같다.

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + [B]\{f_a\} + [L]\{\dot{Z}_r\} \quad (2)$$

여기서 $\{\dot{Z}_r\} = \{ \dot{z}_{r1}, \dot{z}_{r2} \}^T$

$$[A] = \begin{bmatrix} -M_s^{-1}R_s^T C_s R_s & -M_s^{-1}R_s^T K_s & M_s^{-1}R_s^T C_s R_u & 0 \\ R_s & 0 & -R_u & 0 \\ M_u^{-1}R_u^T C_s R_s & M_u^{-1}R_u^T K_s & -M_u^{-1}R_u^T C_s R_u - M_u^{-1}R_u^T K_T & 0 \\ 0 & 0 & R_u & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} M_s^{-1}R_s^T \\ 0 \\ -M_u^{-1}R_u^T \\ 0 \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I \end{bmatrix}$$

2.2 능동 제어용 유압계

유압 밸브와 유압 작동기로 구성되는 능동 제어용 유압계를 그 특성을 반영할 수 있는 단순화된 비선형모델로 모델링 하였고, 이에 대한 그림을 Fig. 2에 나타내었다.

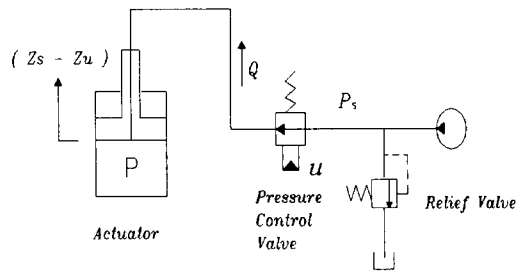


Fig. 2. Simplified Model of Hydraulic System

연속 방정식과 유량 방정식으로부터 유도한 유압계의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{P} = -a_1(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - a_2 P + a_3 u \sqrt{P_s - \text{sgn}(u)P} \quad (3)$$

여기서, 계수 a_1, a_2, a_3 는 유압계에 따라 정해지는 상수이다.

3. 제어 이론

3.1 스카이훅 제어

스프링 상 질량의 절대속도를 귀환하여 감쇠력을 조절하도록 하는 스카이 훅 제어기를 적용하면 다음과 같다.

$$\{F_{sky}\} = [K_{sky}]\{Z_{si}\} \quad (4)$$

여기서, $\{F_{sky}\} = \{f_1, f_2\}^T$

$$\begin{aligned} \{Z_{st}\} &= \{ \dot{z}_{s1} \quad \dot{z}_{s2} \}^T \\ [K_{sky}] &= \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & (\frac{s}{\phi} > 1) \\ \frac{s}{\phi} & (|s| \leq 1) \\ -1 & (\frac{s}{\phi} < -1) \end{cases} \quad (10)$$

3.2 슬라이딩 모드 제어

3.2.1 공칭 모델에 대한 제어기 설계

전장에서 모델링한 유압계의 공칭 모델에 대해 제어기를 설계한다.

유압계 특성 방정식을 일반식 형태로 나타내면 식(5)와 같다.

$$\dot{x} = \hat{f}(x, \dot{z}_s - \dot{z}_u) + \hat{g}(x)u \quad (5)$$

여기서 $x = P$

$$\hat{f} = -\hat{a}_1(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - \hat{a}_2 P$$

$$\hat{g} = \hat{a}_3 \sqrt{P_s - \text{sgn}(u)P}$$

유압계에 입력되는 제어 신호를 추종하는 것이 본 제어기의 목적이므로 슬라이딩 면을 다음과 같이 정의한다.

$$s = x - x_d \quad (6)$$

여기서 x_d 는 유압계에 입력되는 제어 신호이다.

Lyapunov 안정 조건으로부터 슬라이딩 조건을 다음과 같이 나타낸다.

$$s \dot{s} \leq -\eta |s| \quad (\eta > 0) \quad (7)$$

슬라이딩 면의 정의로부터 s 의 부호를 고려하여 제어입력을 구하면

$s > 0$ 인 경우

$$u = \hat{g}^{-1} [-\hat{f} + \dot{x}_d - K] \quad (8a)$$

$s < 0$ 인 경우

$$u = \hat{g}^{-1} [-\hat{f} + \dot{x}_d + K] \quad (8b)$$

위에서 구한 두 가지 제어 입력 식을 sgn 함수를 이용하여 하나의 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$u = \hat{g}^{-1} [-\hat{f} + \dot{x}_d - K \text{sgn}(s)]$$

$$(\text{단, } K \geq \eta) \quad (9)$$

채터링 현상을 억제하기 위하여 함수 $\text{sgn}(s)$ 대신에 식(10)으로 정의되는 포화함수 $\text{sat}(s)$ 를 식(9)에 적용한다.

따라서 공칭 모델에 대한 슬라이딩 모드 제어에 의한 제어입력은 식(11)이 된다.

$$u = \hat{g}^{-1} [-\hat{f} + \dot{x}_d - K \text{sat}(s)] \quad (11)$$

3.2.2 파라미터 변동을 고려한 강건한 제어기의 설계

전 절의 공칭 모델에 대한 제어기는 대상 유압계의 파라미터를 정확히 파악하고 있으며, 이러한 파라미터들이 변동하지 않는다는 가정 하에 구성된 제어기이다.

그러나 유압계의 파라미터들은 변동하게 되므로 이것을 고려할 수 있는 강건한 제어기가 필요하다.

실제 시스템과 공칭 모델을 다음과 같이 나타낸다.

실제 시스템 :

$$\dot{x} = f(x, \dot{z}_s - \dot{z}_u) + g(x)u \quad (12a)$$

공칭 모델 :

$$\dot{x} = \hat{f}(x, \dot{z}_s - \dot{z}_u) + \hat{g}(x)u \quad (12b)$$

공칭 모델에 대해 구한 제어입력을 식(12a)의 실제 시스템에 대입하고 Lyapunov 안정조건을 만족하는 식을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s\dot{s} = s[f + g(\hat{g}^{-1}(-\hat{f} + \dot{x}_d - K\text{sgn}(s))) - \dot{x}_d] \leq -\eta |s| \quad (13)$$

식을 정리하면 다음과 같다.

$$K \geq |(g^{-1}\hat{g}f - \hat{f}) + (g^{-1}\hat{g} - 1)(-\dot{x}_d)| + g^{-1}\hat{g}\eta \quad (14)$$

식(14)의 우변의 식을 정리하고 부등식의 충분 조건을 만족시키도록 K 를 선정하면 식(14)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \beta_0(F + \eta) + |\beta_0 - 1| |\hat{f} - \dot{x}_d| \quad (15)$$

여기서 F, β_0 는 다음과 같이 선정하였다.

$$F(x, \dot{z}_s - \dot{z}_u) = |\dot{f} - f| \quad (16)$$

$$= |(a_1 - \hat{a}_1)(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + (a_2 - \hat{a}_2)x|$$

$$\beta_o = \sqrt{\frac{g_{\max}}{g_{\min}}}$$

$$\beta_o^{-1} \leq \frac{\hat{g}}{g} \leq \beta_o$$

따라서 파라미터의 변동을 고려한 제어 게인 K 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \beta_o \Delta a_{1_{\max}} (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + \Delta a_{2_{\max}} x + \eta | \quad (17)$$

$$+ |\beta_o - 1| |\hat{a}_1 (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + a_2 x - \dot{x}_d |$$

$$\text{여기서 } \Delta a_{1_{\max}} = \max |a_1 - \hat{a}_1|$$

$$\Delta a_{2_{\max}} = \max |a_2 - \hat{a}_2|$$

3.3 합성 제어기

현가계 거동을 제어하기 위한 능동 제어 신호를 발생시키고 이 신호를 유압 작동기가 추종할 수 있도록 하는 합성제어기를 구성하였고 구성도를 Fig. 3에 도시하였다.

스카이록 제어에 의한 능동 제어 신호를 유압계가 추종하도록 하는 제어 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \hat{g}^{-1} \left[-\dot{f} - \frac{C_{sky} \ddot{z}_s}{A_a} - K \text{sat}(s) \right] \quad (18)$$

여기서 C_{sky} : 스카이록 댐퍼 상수

A_a : 유압작동기 수압부 면적

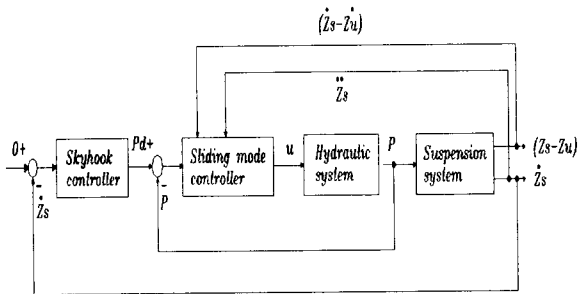


Fig. 3. Configuration of Hybrid Controller

4. 능동 제어 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

전술한 합성제어기를 Table 1에 제시된 파라미터를 갖는 1/2차량 능동 현가계에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제어기에 적용한 설계변수로는 $K_1 = K_2 = 3000$, $\phi = 2.5E5$, $\eta = 1.0$ 이며, 유압계 상수는 다음과 같다.

$$\hat{a}_1 = 4.5E12, \hat{a}_2 = 9.8E-5, \hat{a}_3 = 1.2E7$$

현가계의 주요 성능 평가 함수인 노면 외란에 대한 전달함수를 Fig. 4, Fig. 5에 도시하였고 제어 신호에 대한 추종 성능을 Fig. 6에 도시하였다.

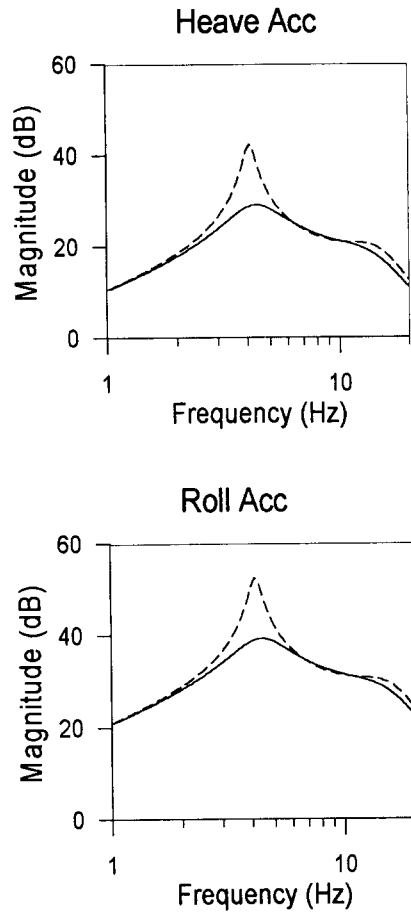


Fig. 4. Heave, Roll Transfer Function (dashed: Uncontrolled, solid: Controlled)

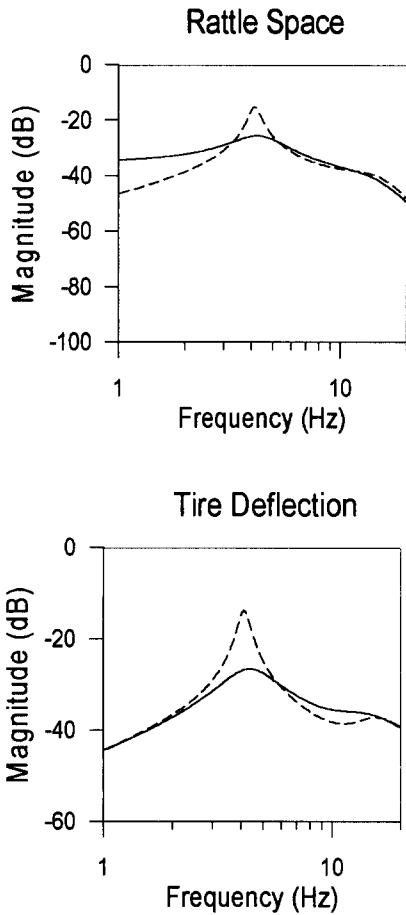


Fig. 5. Rattle Space , Tire Deflection Transfer Function (dashed: Uncontrolled, solid: Controlled)

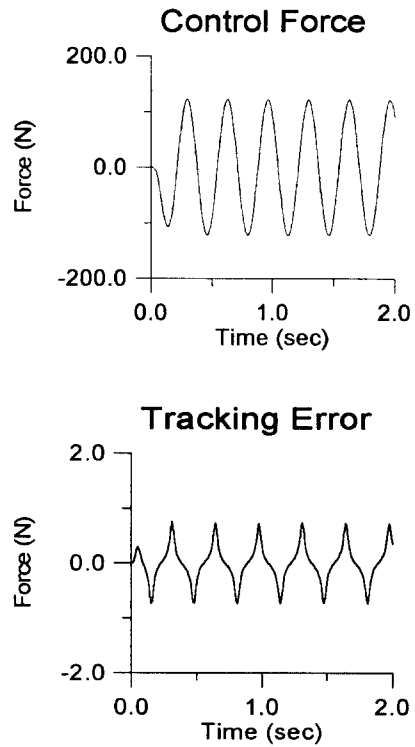


Fig. 6. Tracking Performance of Hydraulic Actuator to the Command

4.2 능동 제어 실험

설계된 능동 제어기의 제어 성능을 확인하기 위하여 Fig. 7과같이 4 자유도를 갖는 1/2 차량 실험 장치를 구성하여 능동제어 실험을 수행하였다.

Table 1 Parameters of Half Car Suspension System

Parameter	Unit	Value.
Sprung Mass	kg	240
Sprung Inertia	$kg \cdot m^2$	22
Unsprung Mass	kg	84
Unsprung Inertia	$kg \cdot m^2$	12
Equivalent Stiffness	N/m	169000
Equivalent Damping	$N \cdot sec/m$	1750
Tire Stiffness	N/m	175500

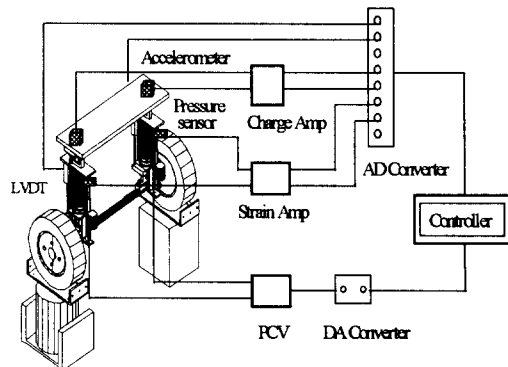


Fig. 7. Experimental Setup for Active Control of Half Car Rig

실험은 차량의 한쪽 바퀴에 가진기로 노면 외란을 가하고 차량의 거동 및 유압 작동압력을 측정, 귀환하여 능동 제어를 수행하도록 하였다.

제어 및 비제어시의 정현파 외란에 대한 본 현가 실험 장치의 스프링 상 질량 가속도를 Fig. 8에 도시하였으며, 능동 제어에 의해 스프링상 질량의 히브 가속도 및 롤 가속도가 감소됨을 확인하였다.

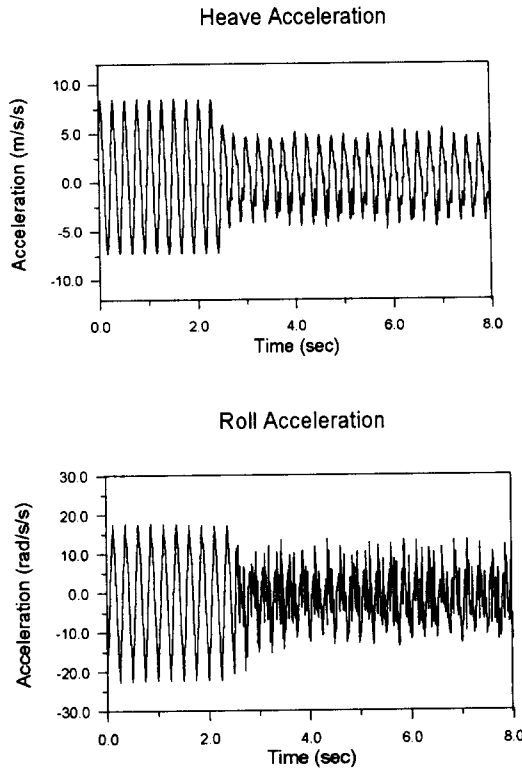


Fig. 8. Heave, Roll Acceleration of a Half Car Rig by Hybrid Control

5. 결론

현가 특성 개선을 위하여 차량 현가계에 능동 제어를 적용하였고, 제어 성능을 파악하기 위하여 1/2 차량 현가 실험장치를 설계, 제작하여 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압력 제어 밸브와 유압작동기로 구성된 능동 제어용 유압계에 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다.
2. 스카이훅 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 함께 적

용하는 합성 제어 알고리즘을 제시하였고 1/2 차량 현가계에 실제 적용, 실험을 수행하여 히브 및 롤 가속도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] D. Hrovat, "Applications of Optimal Control to Advanced Automotive Suspension Design", J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans. of the ASME, Vol. 115, pp. 328-342, 1993.
- [2] C. Yue, K. Hedrick, "Alternative Control Laws for Automotive Active Suspensions", J. of Dynamic System, Measurement and Control, Trans. of the ASME, Vol. 111, pp. 286-291, 1989.
- [3] Y.P. Park, H.S. Yang, H.S. Park, J.S. Park, H.J. Kim, "Active Control of Vehicle Suspension by Sliding Mode Control", Proc. of International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.255-259, 1996.
- [4] 박영필, 양현석, 박혁성, 박재석, 김효준, "차량 현가계의 슬라이딩모드 제어", 자동차공학회 추계 학술대회, pp. 302-307, 1995.
- [5] A. Alleyne, P. D. Neuhaus, J. K. Medrik, "Application of Nonlinear Control Theory to Electronically Controlled Suspensions", Proc. of International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.105-110, 1992.
- [6] Jean-Jacques E. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall
- [7] J. Watton, *Fluid Power Systems*, Prentice-Hall