

---

# 스카이훅 시스템에의 능동 서스펜션 제어이론 적용에 관한 연구

박중현\* · 장승재\*\*

A Study on Adopting Active Suspension Control in Sky Hook System

Jung-hyen Park\* · Seung-jae Jang\*\*

## 요 약

본 논문에서는 스카이훅댐퍼 시스템의 해석 및 설계에 능동 서스펜션 제어 이론을 적용하여 현가장치설계에 응용 할 수 있는 이론 및 실험적 제어장치 적용에 관한 연구를 수행하였다. 최근의 현가장치설계에서는 강성과 감쇠를 능동적으로 제어하는 기술의 적용이 일반화 되고 있으며, 다른 차량안정성제어장치와의 연계성이 높아짐에 따라, 제어시스템설계에서 보다 내구성이 강하고 제어효과의 응답성이 빠르며 정도 또한 높은 제어장치의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구는 댐퍼의 위치관계에 따른 스카이훅시스템을 해석하여 위와 같은 빠른 응답성과 높은 정도의 제어가 가능한 제어시스템을 해석, 설계하기 위하여 강인제어시스템의 적용에 관한 고찰을 하였다. 그리고 제어대상시스템에 대한 강인제어시스템을 설계하기 위한 모델링 및 적용방법을 수식적으로 해석하였으며, 스카이훅현가장치의 제어시스템설계에 중요한 내외란성 향상을 위한 강인제어시스템설계에 적용하는 방법에 관해 고찰하였다.

## ABSTRACT

This paper proposed modelling and design method in suspension system design to analyze sky hook damper system by adopting active suspension control theory. Recent in the field of suspension system design it is general to adopt active control scheme for stiffness and damping, and connection with other vehicle stability control equipment is also intricate, it is required for control system scheme to design more robust, higher response and precision control equipment. It is known that sky hook suspension system is better than passive spring-damper system in designing suspension equipment. We analyze location of damper in sky hook system and its motion equation, then design robust control system. Numerical example is shown for validity of robust control system design in active sky hook suspension system.

## 키워드

스카이훅시스템, 능동서스펜션제어, 강인제어

## I. 서 론

최근의 서스펜션 시스템 설계에서는 강성과 댐퍼를 능동적으로 제어하는 기술의 적용이 일반화 되고 있으며,

다른 차량 안정성 제어장치와의 연계성이 높아짐에 따라, 제어시스템설계에서 보다 내구성이 강하고 제어효과의 응답성이 빠르며 정도 또한 높은 제어장치의 필요성이 요구되고 있다. 서스펜션은, 현가장치 및 충격완화장치로

---

\* 신라대학교 자동차기계공학과

접수일자 : 2006. 4. 7

\*\* 신라대학교 건축학부

써의 기능, 가속도 또는 선회중의 차량자세유지 및 엘라인먼트 변화특성, 거친 노면 주행에서의 진동 승차감 등, 다양한 기본적 성능이 요구된다. 그 외에도 현가장치의 기본구성이나 배치, 스프링, 업소버, 타이어 등 구성부품의 특성을 최적조합으로 하는 것은 높은 수준의 기술을 필요로 한다. 능동서스펜션제어는 보다 우수한 성능을 목표로 다양한 요구를 만족시키기 위하여 개발되고 있다.[1]

서스펜션시스템에 있어서 댐퍼를 병렬로 배치시킨 패시브(passive)시스템과 정지공간에 댐퍼를 매달아 놓은 것과 같은 스카이훅(sky hook)시스템에 있어서 후자가 이상적인 진동억제특성을 갖는다고 알려져 있다. 운동방정식, 진폭의 진동전달율을 비교해 볼 때, 패시브시스템의 경우는 진폭대역에 있어서 감쇠계수에 반응하지 않는 정점이 존재한다. 감쇠계수가 작은 경우 고유진동수 부근에서 진폭은 크지만 높은 진동수에서는 진폭이 작아진다. 감쇠계수가 큰 경우 고유진동수 부근의 진폭이 감소하지만 정점을 경계로 고주파 대역에서 역으로 진폭은 증대한다. 스카이훅시스템에서는 댐퍼의 감쇠계수가 클수록 모든 진동수영역에서 진폭이 감소하는 이상적인 특성을 가진다. 본 연구에서는 이러한 사실에 주목하여 스카이훅시스템에 장인제어이론을 적용하여 능동 서스펜션 시스템을 설계한다. 운동방정식 및 상태공간표현에 관해 고찰하고 외란과 제어출력관계를 해석하여 안정화 피드백 컨트롤러의 존재성에 대하여 살펴본 다음, 제어시스템을 적용하기 위한 조건을 해석하여 설계, 4분의 1 차체모델의 스카이훅시스템에 적용, 본 연구의 유용성에 관하여 논한다.

## II. 능동 현가시스템 설계

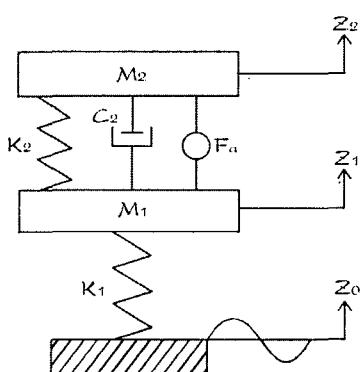


그림 1. 패시브 4분의1차체모델  
Fig. 1 Passive quarter car model

먼저, 패시브시스템과 스카이훅시스템에 관해 간단히 논하겠다. 패시브시스템의 4분의1 차체 서스펜션 모델은 그림1과 같은 상하2자유도 차체모델로써, 스프링과 댐퍼가 병렬로 배치되어있는 일반적인 시스템이다. 외란  $z_0$ 을 노면변위외란으로 가정했을 경우, 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \ddot{M}_1 z_1 + C_2 \dot{z}_1 + (K_1 + K_2) z_1 \\ - C_2 z_2 - K_2 z_2 = F_a + K_1 z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \ddot{M}_2 z_2 + C_2 \dot{z}_2 + K_2 z_2 \\ - C_2 z_1 - K_2 z_1 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

(1), (2)의 운동방정식을 행렬표현을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 - K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ 0 \end{bmatrix} z_0 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_a \quad (3)$$

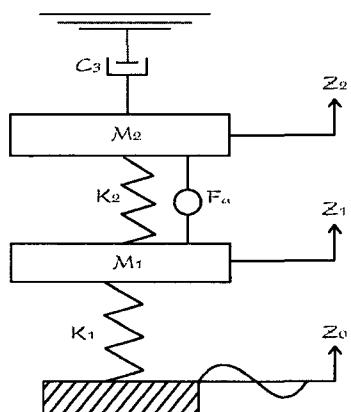


그림 2. 스카이훅 서스펜션 시스템  
Fig. 2 Sky hook suspension system

스카이훅 서스펜션 시스템은 그림2와 같이 정지공간에 댐퍼를 매달아 놓은 것과 같은 스프링, 댐퍼 시스템이며, 그림1의 시스템과 비교할 때 이상적인 진동억제특성을 갖는다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 스카이훅 시스템이 차량모델에 적용 가능하다는 가정 하에서 능동 서스펜션 제어시스템을 설계하는 방법으로써 장인제어

이론의 해석 및 적용에 관한 설계방법을 제시한다. 스카이혹 서스펜션 시스템의 운동방정식은

$$\ddot{M_1 z_1} + (K_1 + K_2)z_1 - K_2 z_2 = F_a + K_1 z_0 \quad (4)$$

$$\ddot{M_2 z_2} + C_3 \dot{z}_2 + K_2 z_2 - K_2 z_1 = 0 \quad (5)$$

과 같으며 행렬표현으로

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 - K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ 0 \end{bmatrix} z_0 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_a \quad (6)$$

과 같이 표현 가능하다. (3)식과 (6)식의 운동방정식, 진폭의 진동전달율을 비교해 볼 때, 패시브시스템의 경우는 진폭대역에 있어서 감쇠계수에 반응하지 않는 정점이 존재한다. 감쇠계수가 작은 경우 고유진동수 부근에서 진폭은 크지만 높은 진동수에서는 진폭이 작아진다. 감쇠계수가 큰 경우 고유진동수 부근의 진폭이 감소하지만 정점을 경계로 고주파 대역에서 역으로 진폭은 증대한다. 스카이혹 시스템에서는 맴퍼의 감쇠계수가 클수록 모든 진동수 영역에서 진폭이 감소하는 이상적인 특성을 가진다.[2]

(6)식의 운동방정식을 다음과 같이 표현한다.

$$\ddot{M_f z_f} + C_f \dot{z}_f + K_f z_f = H_f w + F_f u \quad (7)$$

$$M_f = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, C_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_3 \end{bmatrix},$$

$$K_f = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 - K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix},$$

$$H_f = \begin{bmatrix} K_1 \\ 0 \end{bmatrix}, F_f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, z_f = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

본 연구에서는 스카이혹 서스펜션 시스템의 능동제어 방법으로 강인제어시스템설계이론인  $H_\infty$  제어를 적용 한다.  $x$ 을 시스템의 상태,  $u$ 을 조작입력  $F_a$ ,  $w$ 을 외란입력  $z_0$ ,  $z$ 을 제어출력,  $y$ 을 관측출력으로 하여 (7)식의 운동방정식을 다음과 같은 상태공간표현으로 모델링한다.

$$\dot{x} = A_f x + B_{1f} w + B_f u$$

$$z = C_{1f} x + D_{12} u \quad (8)$$

$$y = C_{2f} x + D_{21} w$$

행렬 및 설계변수 파라미터 값은 다음과 같다.

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_f^{-1} K_f - M_f^{-1} C_f \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{1f} = \begin{bmatrix} 0 \\ M_f^{-1} H_f \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ M_f^{-1} F_f \end{bmatrix}$$

$$C_{2f} = [F_f^T \ 0], \ x = \begin{bmatrix} z_f \\ z_0 \end{bmatrix}$$

장인  $H_\infty$  제어에 있어서의 정수  $\gamma$ , 임의의 정정행렬  $V_1, V_2$ 에 대하여  $X, Y$ 을 변수로 하는 다음과 같은 두 개의 Riccati방정식

$$A_f^T X + X A_f + \gamma^{-2} X B_{1f} B_{1f}^T X - X B_f B_f^T X + C_{1f}^T C_{1f} + V_1 = 0 \quad (9)$$

$$A_f Y + Y A_f^T + \gamma^{-2} Y C_{1f}^T C_{1f} Y - Y C_{2f}^T C_{2f} Y + B_{1f} B_{1f}^T + V_2 = 0 \quad (10)$$

이  $\gamma^2 Y^{-1} > X$ 을 만족하는 정정해  $X, Y$ 가 존재하면, 페루프시스템을 내부안정으로 하며 동시에 다음의 외란  $w$ 에서 제어출력  $z$ 까지의 전달함수  $T_{zw}(s)$ 의  $H_\infty$  norm 조건

$$\| T_{zw}(s) \|_\infty < \gamma \quad (11)$$

을 실현가능한 안정화 컨트롤러가 존재한다. 그리고 그와 같은 컨트롤러의 하나를 다음과 같이 정의 할 수 있다.[3]

$$\hat{x} = (A_f + \gamma^{-2} B_{1f} B_{1f}^T X - B_f B_f^T X - Z C_{2f}^T C_{2f} - \gamma^{-2} Z V_1) \hat{x} + Z C_{2f}^T y \quad (12)$$

$$u = -B_f^T X \hat{x}$$

여기서  $Z = \gamma^2 (\gamma^2 Y^{-1} - X)^{-1}$  이다.

### III. 수치 시뮬레이션

본 연구의 유용성을 검증하기 위하여, 스카이혹 서스

펜션 시스템의 능동 현가장치에강인제어시스템을 적용해본다. 그림2의상하2자유도스카이훅 시스템에 있어서, 사양은 스프링 상부 질량  $M_2 = 267\text{kg}$ , 스프링 하부 질량  $M_1 = 36.6\text{kg}$ , 스프링 계수  $K_2 = 18.7\text{kN/m}$ , 타이어 스프링 계수  $K_1 = 184\text{kN/m}$ , 스카이훅 감쇠계수  $C_3 = 1.4\text{kNs/m}$ 로 설정하였다. 외란  $w(z_0)$ 는 지면으로부터 전달되는 노면 변위 외란으로 설정하였다.

강인  $H_\infty$  제어시스템의 설계수준으로 제어알고리즘을 구성하여 그림2의 설계대상 스카이훅 서스펜션 시스템에 적용하여 수치시뮬레이션을 실시한 결과를 다음에 나타낸다.

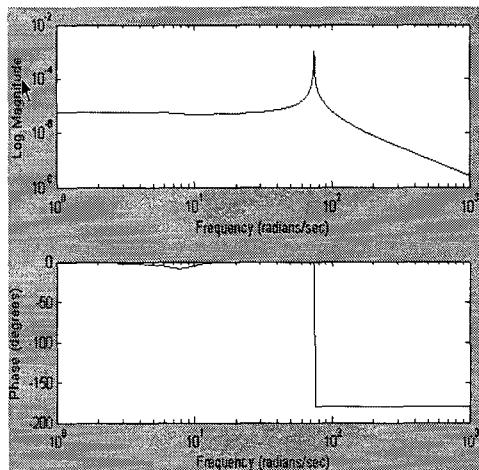


그림 3. 제어대상의 보드선도  
Fig. 3 Bode frequency response of plant

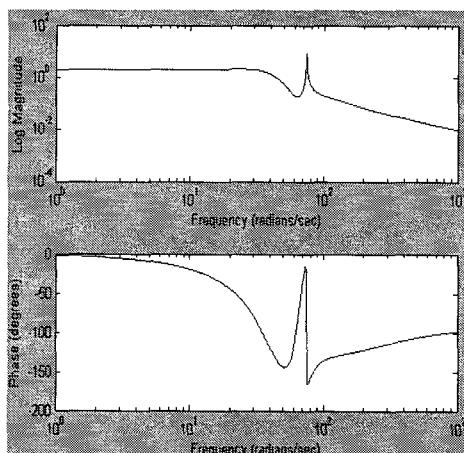


그림 4. 제어기의 보드선도  
Fig. 4 Bode response of controller

그림3은 제어대상의 주파수응답과 위상을 나타내며 약 76rad/sec 부근에서 공진피크가 있음을 알 수 있다. 그림4는 (12)식으로 설계 되어진 컨트롤러의 주파수응답이다.

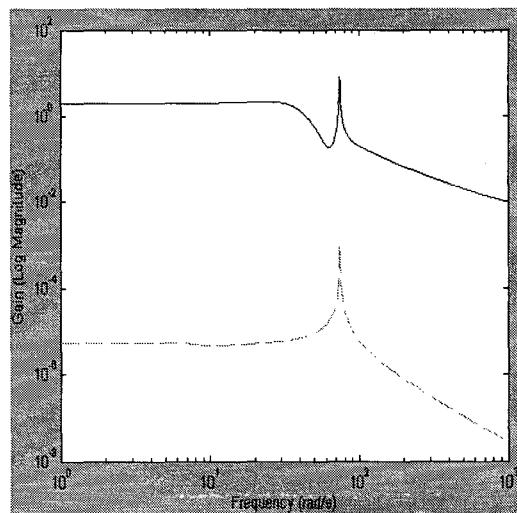


그림 5. 주파수응답비교  
Fig. 5 Frequency response comparison

그림5에 제어대상플랜트(점선)와 컨트롤러(실선)의 주파수응답을 비교하였다. 그림5의 결과에서 알 수 있듯이, 본 연구의 제어대상인 스카이훅 서스펜션 시스템의 제어필요부근에서강인제어이론으로설계되어진컨트롤러가 적절히 반응함을 알 수 있다.강인  $H_\infty$  제어시스템 설계에 있어서의 (11)식  $H_\infty$  norm 조건을 만족하는  $\gamma$ 반복법( $\gamma$ -iteration)의 결과를 표1에 나타낸다. 바운드를  $0 \leq \gamma \leq 10$ 에서 반복계산 한 결과 8.9063이라는 비교적 양호한 수치를 얻었다.

그림6에 지면으로부터 전달되는 노면 변위 외란  $w(z_0)$ 을 나타내었다. 이와 같은 비교적 거친 외란이 제어대상인 스카이훅 서스펜션 시스템에 입력되었을 경우를 설정하여 수치시뮬레이션을 실시하였다. 그림7은 제어입력인 (12)식의강인컨트롤러입력  $u$ 를 나타내며, 그림8에 노면외란에 대한 능동제어 전후의 외란응답을 나타낸다.

표 1.  $\gamma$  반복법 결과

Table. 1 Results of  $\gamma$ -iteration

Test bounds:  $0.0000 < \text{gamma} \leq 10.0000$

gamma	hamx_eig	xinf_eig	hamy_eig	yinf_eig	nrho_xy	p/f
10.000	1.9e-003	1.2e-010	1.8e-001	0.0e+000	0.0143	p
5.000	1.8e-014#	*****	1.8e-001	0.0e+000	*****	f
7.500	4.9e-015#	*****	1.8e-001	0.0e+000	*****	f
8.750	4.0e-013#	*****	1.8e-001	0.0e+000	*****	f
9.375	1.4e-003	1.2e-010	1.8e-001	0.0e+000	0.0182	p
9.063	9.4e-004	1.2e-010	1.8e-001	0.0e+000	0.0217	p
8.906	5.5e-004	1.2e-010	1.8e-001	0.0e+000	0.0249	p
8.828	2.4e-012#	*****	1.8e-001	0.0e+000	*****	f

Gamma value achieved: 8.9063

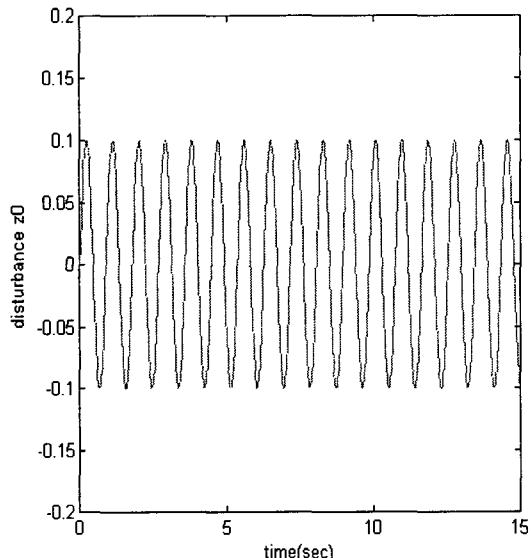


그림 6. 노면외란  $z_0$

Fig. 6 Disturbance  $z_0$

그림8의 점선은 스카이훅 서스펜션 시스템에서 능동 제어가 실행되지 않는 경우( $F_a = 0$ )의 응답이며, 실선 부분이 그림7과 같은 제어입력  $u = F_a$ 가 입력되어진 능동 스카이훅 서스펜션 시스템의 응답이다. 그림7의 결과는 외란에 적절히 대응하는 제어입력값이 구해졌음을 보여주며, 그림8은 본 연구의 강인제어방법이 노면외란에 유효함을 나타내고 있다.

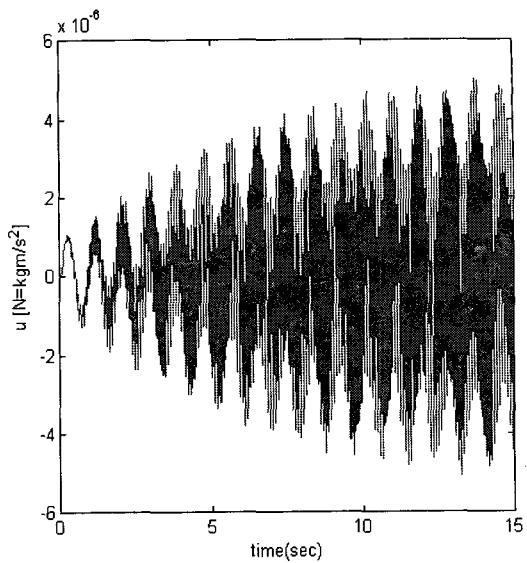


그림 7. 제어입력  $u$

Fig. 7 Control input  $u$

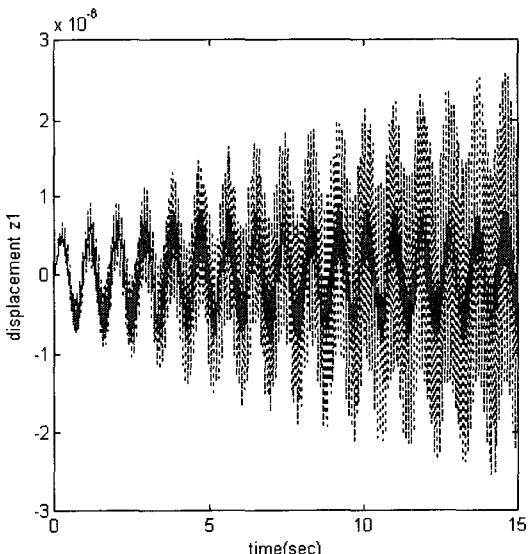


그림 8. 노면외란응답  $z_1$

Fig. 8 Road disturbance response  $z_1$

#### IV. 결 론

본 연구에서는 스카이훅 서스펜션 시스템의 능동현  
가제어장치설계에 강인제어시스템을 설계해 보았으며,  
4분의 1 차량모델에 대상 스카이훅시스템을 구성하여 수  
치 시뮬레이션을 통하여 본 연구의 유효함을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] E. I. Ono, "A Study on the Integrated Control of Automotive Dynamics", Journal of Systems, Control and Information, Vol. 49, No. 6, 2005, pp. 205-210
- [2] 車両システムのダイナミックスと制御, 社団 法人 日本機械學會編, 養賢堂 (1999)
- [3] J. H. Park "Combined Optimal Design with Minimum Phase System", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 10, No 2, 2004, pp. 192-196

#### 저자소개



박 중 현(Jung-Hyun Park)  
부산대학교 생산기계공학과 공학사  
고배대학교 시스템공학과 공학석사  
고배대학교 시스템과학과 공학박사  
2001년~현재 신라대학교 조교수

※ 관심분야: 차량시스템해석, 강인성제어, 최적설계



장 승재(Seung-Jae Jang)

동아대학교 건축공학과 공학사  
동아대학교 건축공학과 공학석사  
동아대학교 건축공학과 공학박사  
1998년~현재 신라대학교 부교수

※ 관심분야: 강도역학, 건축시스템분석, 최적설계