

---

# 센서위치를 고려한 능동 서스펜션 강인제어에 관한 연구

박중현\* · 장승재\*\*

A Study on Active Suspension Robust Control with Sensor and Actuator Location

Jung-hyen Park\* · Seung-jae Jang\*\*

## 요 약

본 논문에서는 스카이훅댐퍼 시스템의 해석 및 설계에 능동 서스펜션 강인제어 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 센서의 위치관계에 따른 능동현가시스템을 해석하여 위와 같은 빠른 응답성과 높은 정도의 제어가 가능한 제어시스템을 해석, 설계하기 위하여 강인제어시스템의 적용에 관한 고찰을 하였다. 그리고 제어대상시스템에 대한 강인제어시스템을 설계하기위한 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 robust 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 sensor and actuator 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, 센서-액추에이터 위치, 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 충격완화장치로써의 기능, 가속도 또는 선회중의 차량자세유지 및 얼라인먼트 변화특성, 거친 노면 주행에서의 진동 승차감 등,

---

\* 신라대학교 자동차기계공학과

접수일자 : 2006. 5. 8

\*\* 신라대학교 건축학부

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 강인제어이론을 적용하여 능동 서스펜션 시스템을 설계한다. 운동방정식 및 상태공간표현에 관해 고찰하고 외란과 제어출력관계를 해석하여 안정화 피드백 컨트롤러의 존재성에 대하여 살펴본 다음, 센서와 액추에이터의 최적위치 관계를 고려하여 강인제어시스템을 설계, 적용하여 수치 시뮬레이션을 통해 본 연구의 유용성에 관하여 논한다.

## II. 강인제어시스템 설계

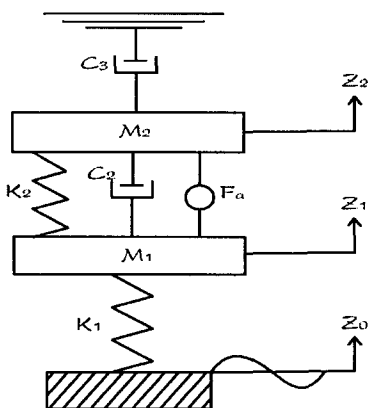


그림 1. 능동 스카이훅 서스펜션 시스템  
Fig. 1 Active sky hook suspension system

본 논문에서는 그림1과 같은 스카이훅 서스펜션 시스템을 제어대상으로 하여 내구성이 강하고 제어효과의 응답성이 빠르며 정도 또한 높은 센서와 액추에이터의 배치 문제를 고려한 능동 강인제어시스템을 설계하는 것을 목적으로 한다. 외란  $z_0$ 을 노면변위의외란으로 가정했을 경우, 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_1 \ddot{z}_1 + C_2 \dot{z}_1 + (K_1 + K_2)z_1 - C_2 \dot{z}_2 - K_2 z_2 = F_a + K_1 z_0 \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{z}_2 + (C_2 + C_3) \dot{z}_2 + K_2 z_2 - C_2 \dot{z}_1 - K_2 z_1 = 0 \quad (2)$$

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

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 + C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 - K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ 0 \end{bmatrix} z_0 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_a \quad (3)$$

(3)식의 운동방정식을 다음과 같이 표현한다.

$$M_f \ddot{z}_f + C_f \dot{z}_f + K_f z_f = H_f w + F_f u \quad (4)$$

$$M_f = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, C_f = \begin{bmatrix} C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 + C_3 \end{bmatrix},$$

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

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

본 연구에서는 스카이훅 서스펜션 시스템의 능동제어방법으로 강인제어시스템설계이론인  $H_\infty$  제어를 적용한다.  $x$ 을 시스템의 상태,  $u$ 을 조작입력  $F_a$ ,  $w$ 을 외란입력  $z_0$ ,  $z$ 을 제어출력,  $y$ 을 관측출력으로 하여 (4)식의 운동방정식을 다음과 같은 상태공간표현으로 모델링한다.

$$\dot{x} = A_f x + B_{1f} w + B_{2f} u$$

$$z = C_{1f} x + D_{12} u \quad (5)$$

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

행렬 및 설계변수 파라미터 값은 다음과 같다.

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_f^{-1}K_f - M_f^{-1}C_f & \end{bmatrix}$$

$$B_{1f} = \begin{bmatrix} 0 \\ M_f^{-1}H_f \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ M_f^{-1}F_f \end{bmatrix}$$

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

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

$$A_f^T X + X A_f + \gamma^{-2} X B_{1f} B_{1f}^T X - X B_f B_f^T X + C_{1f}^T C_{1f} + V_1 = 0 \quad (6)$$

$$A_f Y + Y A_f^T + \gamma^{-2} Y C_{1f}^T C_{1f} Y - Y C_{2f}^T C_{2f} Y + B_{1f} B_{1f}^T + V_2 = 0 \quad (7)$$

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

$$\| T_{zw}(s) \|_\infty < \gamma \quad (8)$$

을 실현가능한 안정화 컨트롤러가 존재한다. 그리고 그와 같은 컨트롤러의 하나를 다음과 같이 정의 할 수 있다.[2]

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

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

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

### III. 수치 시뮬레이션

본 연구의 유용성을 검증하기 위하여, 스카이훅 서스펜션 시스템의 능동 현가장치에 강인 제어시스템을 적용해 본다. 그림1의 상하 2자유도 스카이훅 시스템에 있어서, 사양은 스프링 상부 질량  $M_2 = 267\text{kg}$ , 스프링 하부 질

량  $M_1 = 36.6\text{kg}$ , 서스펜션 스프링 계수  $K_2 = 18700\text{N/m}$ , 타이어 스프링 계수  $K_1 = 1840\text{N/m}$ , 서스펜션 감쇠계수  $C_2 = 14\text{Ns/m}$ , 스카이훅 감쇠계수  $C_3 = 14\text{Ns/m}$  로 설정하였다. 외란  $w(z_0)$ 는 지면으로부터 전달되는 노면 변위 외란으로 설정하였다.

강인  $H_\infty$  제어시스템의 설계수준으로 제어알고리즘을 구성하여 그림1의 제어대상 스카이훅 서스펜션 시스템에 적용하여 수치시뮬레이션을 실시한 결과를 다음에 나타낸다.

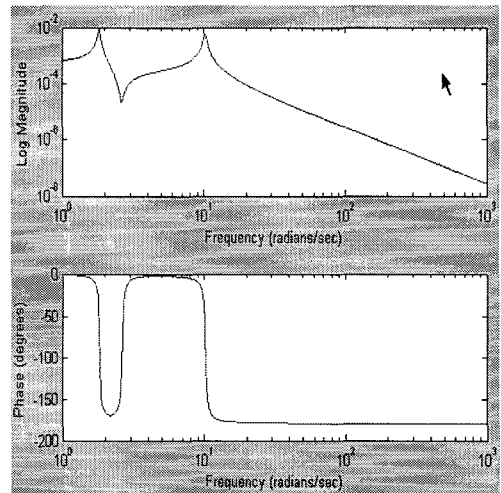


그림 2. 제어대상의 보드선도  
Fig. 2 Bode frequency response of plant

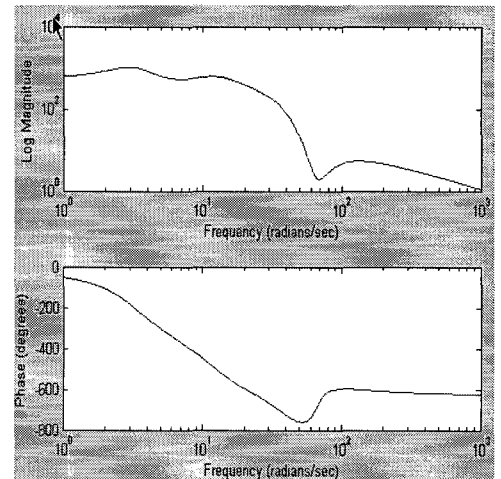


그림 3. 제어기의 보드선도  
Fig. 3 Bode response of controller

그림2는 제어대상의 주파수응답과 위상을 나타내며 그림3은 (9)식으로 설계 되어진 컨트롤러의 주파수응답이다. 이러한 시뮬레이션결과는 (5)식의 관측출력  $y$ 에 관계하는 행렬  $C_y$ 의 파라미터가  $F_y$ 의 전치인  $F_y^T$ 로 표현되는 센서 및 액추에이터가 동위치, 동방향으로 배치되어있을 경우의 결과를 나타낸다. 즉, 센서에서  $M_1$ 의 변위  $z_1$ 을 측정하여 출력피드백을 이용한 강인제어시스템을 설계, 컨트롤러에서 제어입력을 같은 위치에서 입력한다는 것을 의미한다. 센서와 액추에이터가 동위치, 동방향으로 배치되어진 시스템은 최소위상시스템이며 비 최소위상 시스템에 비해 제어효과가 우수하다.[3] 본 연구에서는 이러한 사실에 주목하여 센서와 액추에이터의 배치문제를 고려한 능동 서스펜션의 강인제어시스템을 설계하여 비교, 고찰 해 보겠다. 센서 및 액추에이터를  $M_1$ 에 배치하였을 경우, (8)식  $H_\infty$  norm 조건을 만족하는  $\gamma$ 반복법( $\gamma$ -iteration)의 결과를 표1에 나타낸다. 바운드를  $0 \leq \gamma \leq 10$ 에서 반복계산 한 결과 0.3906의 결과를 얻었다.

표 1.  $\gamma$ 반복법 결과(대칭시스템)  
Table. 1 Results of  $\gamma$ -iteration (symmetric)

Test bounds: 0.0000 < gamma <= 10.0000

gamma	hamx_eig	xinf_eig	hamy_eig	yinf_eig	nrho_xy	p/f
10.000	1.5e-001	1.9e-010	2.4e-001	0.0e+000	0.0007	p
5.000	1.5e-001	1.9e-010	2.4e-001	0.0e+000	0.0028	p
2.500	1.5e-001	1.9e-010	2.4e-001	0.0e+000	0.0113	p
1.250	1.4e-001	1.9e-010	2.4e-001	0.0e+000	0.0466	p
0.625	1.2e-001	1.9e-010	2.3e-001	0.0e+000	0.2134	p
0.313	8.9e-016#	*****	2.0e-001	0.0e+000	*****	f
0.469	9.9e-002	2.0e-010	2.2e-001	0.0e+000	0.4581	p
0.391	6.5e-002	2.0e-010	2.2e-001	0.0e+000	0.9040	p

Gamma value achieved: 0.3906

다음으로 센서를  $M_2$  위치에 배치하여 변위  $z_2$ 을 관측 출력으로 하고, 액추에이터를  $M_1$ 에 배치하여 제어입력을 가하는 경우를 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이렇게 설정되어진 시스템은 비 최소위상시스템이며, 시스템 전달함수는 비대칭이 되어 대칭인 강인제어시스템을 설계하여 적용하는 것이 불가능하다. 이러한 설정에서의 (8)식 조건을 만족하는  $\gamma$ 반복법( $\gamma$ -iteration)의 결과를 표2에 나타낸다.

표 2.  $\gamma$ 반복법 결과(비대칭시스템)  
Table. 2 Results of  $\gamma$ -iteration (non-symmetric)

Test bounds: 0.0000 < gamma <= 10.0000

gamma	hamx_eig	xinf_eig	hamy_eig	yinf_eig	nrho_xy	p/f
10.000	2.2e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.0009	p
5.000	2.2e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.0037	p
2.500	2.2e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.0150	p
1.250	2.2e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.0620	p
0.625	2.2e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.2884	p
0.313	1.3e-014#	*****	2.2e-001	0.0e+000	*****	f
0.469	1.8e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	0.6383	p
0.391	1.1e-001	1.5e-015	2.3e-001	0.0e+000	1.3768#	f

Gamma value achieved: 0.4688

표1과 2의 결과비교에서 센서와 액추에이터를 동위치, 동방향으로 배치한 시스템이 보다 작은  $\gamma$ 값을 얻을 수 있었다. 강인  $H_\infty$  제어시스템설계에서 작은  $\gamma$ 값의 실현은 보다 우수한 제어성능을 나타내는 것이므로 센서 및 액추에이터를  $M_1$ 에 배치시키는 것이 보다 우수한 제어시스템 설계라는 것을 알 수 있다. 그림4는 비대칭대상시스템의 보드선도를 나타내며 그림5는 이러한 시스템에 대해 설계된 제어기의 주파수응답이다.

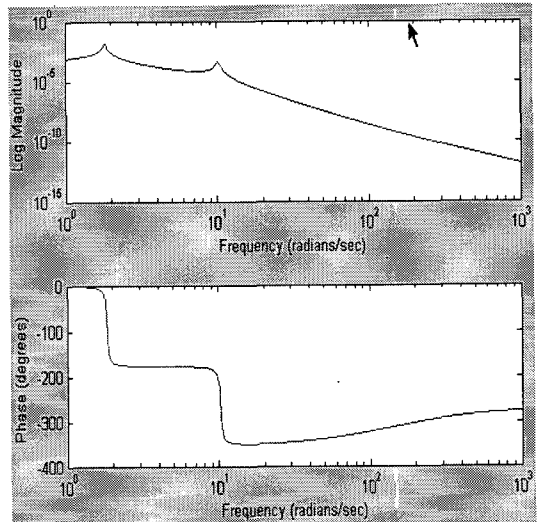


그림 4. 비대칭 제어대상의 보드선도  
Fig. 4 Bode response of non-symmetric plant

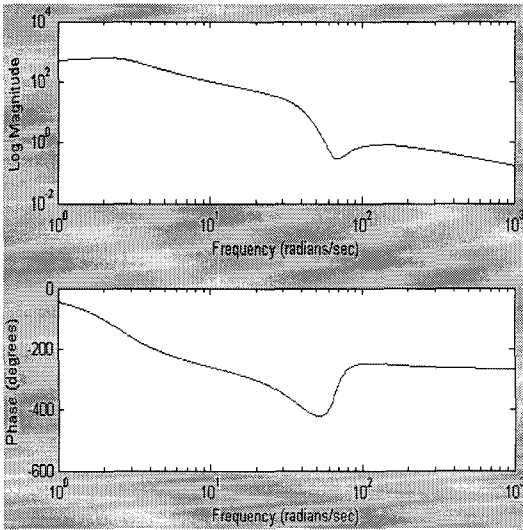


그림 5. 비대칭 제어기의 보드선도

Fig. 5 Bode response of non-symmetric controller

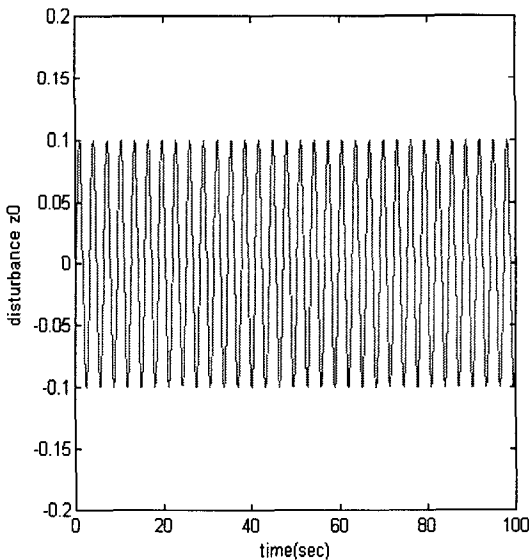


그림 6. 노면외란  $z_0$

Fig. 6 Disturbance  $z_0$

그림6에 지면으로부터 전달되는 노면 변위 외란  $w(z_0)$ 을 나타내었다. 이와 같은 비교적 거친 외란이 제어 대상인 스카이훅 서스펜션 시스템에 입력되었을 경우를 설정하여 수치시뮬레이션을 실시하였다. 그림7과 그림8은 노면외란에 대한 능동제어 전후의 외란응답을 나타낸다. 그림8 및 그림9의 점선은 스카이훅 서스펜션 시스템

에서 능동제어가 실행되지 않는 경우( $F_a=0$ )의 응답이며, 실선부분이 제어가 실시되어진 능동 스카이훅 서스펜션 시스템의 응답이다. 그림의 결과는 외란에 적절히 대응하는 본 연구의 강인제어방법이 노면외란에 유효함을 나타내고 있다.

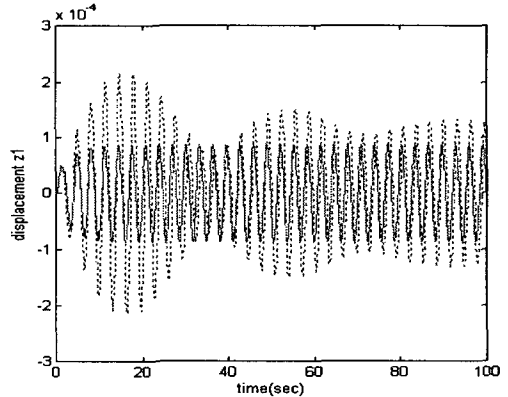


그림 7. 노면외란응답  $z_1$

Fig. 7 Road disturbance response  $z_1$

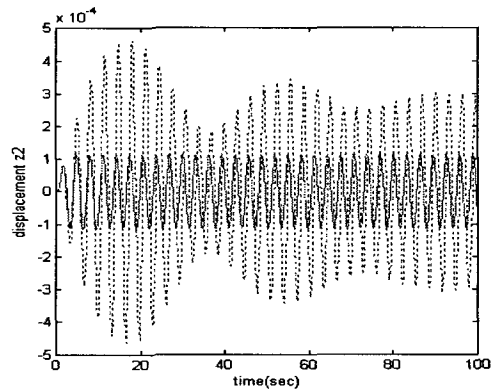


그림 8. 노면외란응답  $z_2$

Fig. 8 Road disturbance response  $z_2$

#### IV. 결 론

본 연구에서는 스카이훅 서스펜션 시스템의 능동현가 제어장치설계에 센서와 액추에이터 위치관계를 고려한 강인제어시스템을 설계해 보았으며, 4분의 1 차량모델의 대상 스카이훅 시스템을 구성하여 수치 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, pp. 205-210, 2005
- [2] J. H. Park "Combined Optimal Design with Minimum Phase System", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 10, No 2, pp. 192-196, 2004
- [3] 박중현, 김순호, "능동서스펜션장치에의대칭제어시스템적용에관한 연구", 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 10, No 4, pp. 192-196, 2006

저자소개

**박 중 현(Jung-Hyeon Park)**



부산대학교 생산기계공학과 공학사  
고배대학교 시스템공학과 공학석사  
고배대학교 시스템과학과 공학박사  
2001년~현재 신라대학교 조교수

※ 관심분야: 차량시스템해석, 강인성제어, 최적설계

**장 승 재(Seung-Jae Jang)**



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

※ 관심분야: 디지털모델해석, 건축시스템, 최적설계