

능동과 반능동 현가장치로 된 전차량 모델에 대한 스카이훅 제어기의 비교 평가

Comparative Evaluation of Sky-Hook Controllers for a Full Car Model with Active or Semi-Active Suspension Systems

윤 일 중, 임 재 필
(Iljoong Youn and Jaepil Im)

Abstract : The controllers for a full car 7-DOF model with 4 active or semi-active suspension units are designed and evaluated in this research. The control algorithms for suspension systems, such as full state feedback active, full state feedback semi-active, sky-hook active, sky-hook semi-active, and on-off suspension systems, are analyzed and evaluated with respect to ride comfort. The vehicle dynamic performances are expressed by response curves to a bump input, performance indices for asphalt road input, and frequency characteristic curves. Heaving, rolling, and pitching inputs are applied to the vehicle dynamic system to evaluate frequency characteristics. The simulation results show that the ride quality of the sky-hook controller approaches that of full state feedback controller more closely in semi-active suspension system than in active suspension system. For the implementation of a vehicle with sky-hook suspension control systems in this paper, 7 velocity sensors are required to measure the states.

Keywords : full car model, semi-active suspension system, sky-hook damper, frequency characteristics

I. 서론

많은 종류의 차량들이 각자 고유 기능을 가지고 있고 차량 고유의 동적 기능을 높이기 위해서 적절한 현가장치의 설계가 요구된다. 예를 들면 트럭, 스포츠카, 경주용차는 주행안정성 향상을 좀 더 고려해서 현가장치를 설계해야 할 것이며 승용차는 승차감 위주로 설계를 해야 할 것이다. 궤도차량의 관점에서 살펴보면 민수용은 안정성을 군수용은 기동성을 향상시켜야 하므로 민수용은 주행안정성, 군수용은 승차감을 높이는 방향으로 설계되어야 한다. 왜냐하면 기동성 향상을 위해서는 운전자가 조종 가능한 속도 한계를 높여야 하기 때문이다[1]. 차량의 동적 특성을 고유 동적 기능에 맞추어 향상시키는 데에는 새로운 개념의 현가 장치 개발이 꾸준히 요구된다. 설계과정에서 기본적으로 고려해야 할 사항은 다음과 같다. 우선은 주어진 공간에서 현가장치의 구조를 개선해야 하며 다음은 차량의 고유 기능과 성능 요구 조건에 적절한 현가의 매개변수를 결정하는 것이고 마지막은 능동적으로 제어할 수 있는 장치를 설치하여 적절한 제어로직으로 원하는 차량의 동특성을 성취하는 것이다[2]-[4]. 본 연구는 능동적인 방법을 통해서 차량의 요구 성능을 향상시킬 수 있는 제어로직들을 정량적으로 분석하여 평가하는 것이 목표이다.

능동 현가장치의 제어기를 설계할 때에는 승차감과 조종안정성의 상충되는 요구 조건을 만족시키기 위해서 설계 사양과 설계자의 경험에 따라 적절한 절충을 하게 된다. 승

차감 관점에서 제어기들의 성능평가를 위한 본 연구에서 수행된 3가지 평가 방법을 소개하면, 첫째로는 차량의 한 쪽에 범프 입력을 통과시키면 히빙(heaving), 롤링(rolling), 피칭(pitching) 운동이 동시에 일어나므로 여러 가지 상태(state) 중에서 승차감에 해당하는 값들을 비교 평가하는 방법이다. 즉 일반적으로 차체의 가속도나 각 가속도 값들이 작을수록 승차감은 향상되는 것으로 판단한다. 두 번째로는 아스팔트 노면을 일정시간 주행했을 때 측정되어지는 각 성능치(최적제어 이론에서 목적 함수에 포함되어 있는 RMS값)를 비교 평가하는 방법이다. 이 방법은 어떤 일정한 속도와 노면에서 각 제어 로직이 차량의 성능에 미치는 바를 단편적으로 비교할 수 있는 방법이다. 세 번째 방법은 주파수 영역에서 각 제어기의 성능을 평가하는 것이다. 네 바퀴에 적용되는 입력은 3가지로 분류해서 적용하고 각 입력에 해당하는 차체의 출력을 평가하는 방법이다. 즉 히빙(네 바퀴에 같은 위상), 롤링(좌우 바퀴 사이에 180도의 위상차), 피칭(앞뒤바퀴 사이에 180도의 위상차) 입력을 각각 적용한다[5]. 차량이 가지고 있는 고유 모드를 살펴볼 수 있어 물리적으로 중요한 의미를 함축하고 있는 평가방법이다. 평가대상 시스템의 구성은 단순화된 전차량 모델에 4개의 능동형이나 반능동형 현가장치로 이루어졌다. 대상 제어 알고리즘들로서는 전상태 피드백(full state feedback) 능동(active), 전상태 피드백 반능동(semi-active), 스카이훅(sky-hook) 능동, 스카이훅 반능동과 on-off 제어 알고리즘들이 있고 Matlab의 Simulink를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 각 제어기들의 성능들이 수동형(passive)의 결과와 비교 평가되었다. 본 논문에서 말하는 스카이훅 댐퍼라 함은 질량과 일정한 높이의 공간 사이에 댐퍼가 있다고 가정하는 것이다[1]

접수일자 : 2000. 11. 22., 수정완료 : 2001. 4. 23.

윤일중 : 경상대학교 기계공학과, 항공기부품기술연구소(iyoun@nongae.gsnu.ac.kr)

임재필 : 경상대학교 기계공학과(xpeel@hanmail.net)

※ 본 논문은 국방과학연구소와 동명중공업(주)에서 지원하여 연구하였습니다.

[6]. 실제 이러한 효과를 낼 수 있는 것은 능동시스템에서만 가능하다. 왜냐하면 전상태 피드백 제어력 $u=-Kx$ 에 의해서 계산되는데 상태벡터 x 는 모두 다 측정하는 것은 불가능하므로(예를 들면, 타이어 변위는 측정하기에 어려운 것으로 알려져 있다) 질량의 상하 절대속도만을 측정하여 제어력을 계산하면 이는 일정한 높이의 하늘과 질량 사이에서 작용하는 댐퍼와 같은 효과를 나타내므로 이를 스카이훅 댐퍼라고 말한다. 효과 면에서 의심이 갈 수 있지만 승차감 향상을 위해 설계된 제어기는 질량의 절대속도와 제어 개인의 곱이 다른 상태변수에 비해서 절대적인 영향을 미친다. 그래서 이를 스카이훅 댐퍼 개념의 능동시스템으로 명칭하였고 이렇게 계산된 제어력으로 다시 가변댐퍼의 댐핑계수를 결정하는 것을 스카이훅 반응동시스템으로 명칭하였다.

II. 전차량 모델링과 제어기 설계

그림 1은 여러 가지 제어조직의 성능 평가가 수행될 반응동 현가장치로 구성된 전차량의 단순화된 수학적 모델이다. 시뮬레이션에 사용되는 매개변수들은 표 1과 같다. 시스템은 전차량의 운동 중에서 7 자유도 동적 특성을 나타내는 모델이다. 3차원 공간에서의 하나의 강제인 차체(sprung mass)의 운동은 6 자유도로서 모든 운동을 규명할 수 있다. 그러나 모델을 더욱 단순화시키기 위해서 6 자유도 중에서 x 축 방향, y 축 방향, 요잉(yawing) 운동을 나타내는 자유도는 본 연구의 관점인 승차감 측면에서 성능분석을 할 때에 상대적 중요도가 약하므로 생략하고 히빙, 롤링, 피칭 운동을 규명할 수 있는 3 자유도만으로 동적 상태방정식을 표현한다. 그리고 독립 현가로 된 앞 2 바퀴 어셈블리들의 z 축 방향의 2개의 자유도, 일체형으로 된 뒷바퀴 축의 무게중심에서 x 축에 대한 회전운동과 z 축 방향의 2개의 자유도를 이용하면 총 7 자유도로서 어느 정도 현가장치의 동적 특성을 파악할 수 있는 전차량 시스템의 선형 동적 상태방정식이 이다. 전차량을 구성하는 각 부품들의 표기와 크기에 대한 데이터는 표 1과 같다 [7].

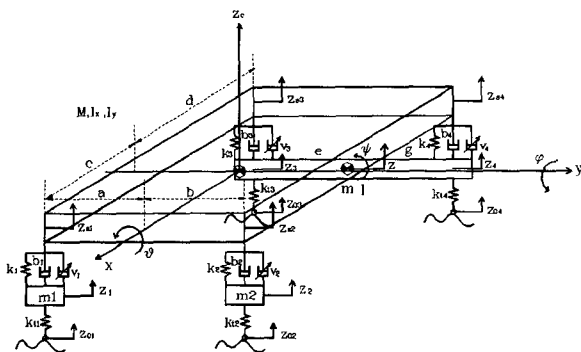


그림 1. 4개의 반응동 현가장치로 구성된 7 자유도 차량의 모델링.

Fig. 1. Modeling of 7-DOF vehicle with 4 semi-active suspension units.

표 1. 7 자유도 시스템 모델의 매개 변수 값.

Table 1. Parameter values of 7-DOF system model.

parameters	values
M	1460 kg
I_x	460 kg · m ²
I_y	2460 kg · m ²
m_1, m_2	40 kg
m	71 kg
k_1, k_2	19960 N/m
k_3, k_4	17500 N/m
b_1, b_2 (semi-active)	1290 N · sec/m (200 N · sec/m)
b_3, b_4 (semi-active)	1620 N · sec/m (200 N · sec/m)
v_{min}	200 N · sec/m
v_{max}	5000 N · sec/m
I	50 kg · m ²
$k_{t1}, k_{t2}, k_{t3}, k_{t4}$	175500 N/m
ρ_1, ρ_2	1
$\rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6$	500
$\rho_7, \rho_8, \rho_9, \rho_{10}$	3000
$\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{14}$	3×10^{-7}
a, b	0.75 m, 0.75 m
c, d	1.0 m, 1.8 m
e, g	0.75 m, 0.75 m

유도된다. 능동 현가시스템의 동적 상태 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{z}_c = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \tag{1}$$

$$I_x\ddot{\theta} = -af_1 + bf_2 - af_3 + bf_4 \tag{2}$$

$$I_y\ddot{\phi} = -cf_1 - cf_2 + df_3 + df_4 \tag{3}$$

$$m_1\ddot{z}_1 = -f_1 - k_{t1}(z_1 - z_{01}) \tag{4}$$

$$m_2\ddot{z}_2 = -f_2 - k_{t2}(z_2 - z_{02}) \tag{5}$$

$$m\ddot{z} = -f_3 - f_4 - k_{t3}(z_3 - z_{03}) - k_{t4}(z_4 - z_{04}) \tag{6}$$

$$I\ddot{\psi} = ef_3 - gf_4 + ek_{t3}(z_3 - z_{03}) - gk_{t4}(z_4 - z_{04}) \tag{7}$$

여기에서,

$$f_i = -k_i(z_{si} - z_i) + b_i(\dot{z}_{si} - \dot{z}_i) + u_i, \tag{8}$$

$(i = 1, 2, 3, 4)$

III. 능동현가장치의 제어기 설계 및 주파수 응답특성
14개의 상태변수와 4개의 노면 위치 외란을 다음과 같은 벡터로 정의한다.

$$x = [z_c, \dot{z}_c, \theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}, z_1, \dot{z}_1, z_2, \dot{z}_2, z, \dot{z}, \psi, \dot{\psi}]^T$$

$$w = [z_{01}, z_{02}, z_{03}, z_{04}]^T \tag{8}$$

승차감(차체의 상하 가속도), 주행 안정성(타이어의 접지력), 그리고 현가 운동 공간(suspension working space)을 최적화하기 위한 성능지수는 다음과 같다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T [\ddot{z}_c^2 + \rho_1 \dot{\theta}^2 + \rho_2 \dot{\phi}^2 + \sum_{i=1}^4 \rho_{i+2} (z_{si} - z_i)^2]$$

$$+ \sum_{i=1}^4 \rho_{i+6}(z_i - z_{0i})^2 + \sum_{i=1}^4 \rho_{i+10} u_i^2] dt \quad (9)$$

성능지수에는 4개의 타이어 변위(tire deflection), 4개의 현가 변위(suspension deflection), 차체 무게중심의 히빙, 롤링, 피칭 가속도의 RMS값들이 포함된다. 주행 여건(즉, 노면의 거칠기, 차의 속도, 기후)과 차의 고유 기능(즉, 승차감 또는 주행 안정성의 중요도)에 따라서 가중치가 정해진다. 가중치들의 크기를 정할 때는 수동형 현가장치의 주행에서 얻은 각 RMS값의 평균값이나 최대값을 기준 자료로 활용하고 시험 자료의 분석과 설계자의 경험에 의해서 적절히 조정된다. 제어기와 노면의 절대 변위를 입력으로 하는 능동시스템의 선형 상태 벡터 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w} \\ = \mathbf{A}_c\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{w} \quad (10)$$

상태 벡터 방정식과 상태 벡터의 정의를 이용해서 성능지수는 상태변수들과 입력의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T \{ \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + 2\mathbf{x}^T \mathbf{N} \mathbf{u} \\ + 2\mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{w} + \mathbf{w}^T \mathbf{T} \mathbf{w} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \} dt \quad (11)$$

여기서, \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 은 대칭행렬(symmetric matrix)이고 $\mathbf{Q} \geq 0$, $\mathbf{R} > 0$ 이다. 여기서 구해지는 능동 제어력은 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{N}^T + \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \mathbf{x} = -\mathbf{K} \mathbf{x} \quad (12)$$

여기서 \mathbf{K} 는 제어게인이고 승차감 향상을 위해서 설계되었다. 스카이훅 댐핑 개념을 포함하는 능동 현가장치를 위한 제어게인은 상태 변수 x_{2i} , $i=1, 2, \dots, 7$,에 해당하는 게인 값만 남기고 나머지는 0으로 만들어서 적용하였다. 즉 상태 변수에서 절대 속도 값들만을 계측하여 제어력을 계산하는 방법이다. 일종의 출력 피드백 제어(output feedback control)이다. 주파수 영역에서 페루프 시스템의 Fourier 변환을 통해서 주파수 출력함수를 다음과 같이 얻을 수 있다[7].

$$y(j\omega) = \mathbf{C}(j\omega \mathbf{I} - \mathbf{A}_c)^{-1} \mathbf{D} [e^{-j\omega\tau_1} e^{-j\omega\tau_2} e^{-j\omega\tau_3} e^{-j\omega\tau_4}]^T \quad (13)$$

여기서 출력의 절대값 $|y(j\omega)|$ 은 위치 입력의 진폭에 대한 출력의 진폭비이다. 히빙 입력은 $i=1, 2, 3, 4$ 에서 $e^{-j\omega\tau_i} = 1$ 이고, 롤링 입력은 $i=1, 3$ 에서 $e^{-j\omega\tau_i} = 1$ 과 $i=2, 4$ 에서 $e^{-j\omega\tau_i} = -1$ 로 만들어지며, 피칭 입력은 $i=1, 2$ 에서 $e^{-j\omega\tau_i} = 1$ 과 $i=3, 4$ 에서 $e^{-j\omega\tau_i} = -1$ 로 만들어진다.

IV. 반능동현가장치의 제어기 설계

그림 1의 단순 모델에서 가변 댐퍼의 댐핑계수는 위에서 구한 능동 제어력, $u_i(t)$ 의 흡수력만을 가변 댐퍼로 구현할 수 있다. 계측된 현가의 상대속도와 능동 제어력(흡

수력)을 이용해서 요구되는 댐핑계수 $v_i(t)$ 를 계산할 수 있다. 변환된 댐핑계수는 요구되는 댐핑력을 발생시킨다. 반능동 현가장치에 해당하는 반선형 상태 벡터방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}(\text{diag } \mathbf{v})\mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{w} \quad (14)$$

여기서

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -a & 0 & -c & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -a & 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & g \\ 0 & 1 & 0 & b & 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -e \end{bmatrix}$$

고정 댐퍼 $b_i = 200$ 이고 흡수력을 제어할 연속가변 댐퍼는 다음 구간 내에서 가변이 가능하다. $0 \leq v \leq 4800$ [N·sec/m] 제어력, \mathbf{u} 는 댐핑력, $-(\text{diag } \mathbf{v})\mathbf{E}\mathbf{x}$ 으로 대체된다. 댐핑 계수를 결정하는 전략은 다음과 같다. 여기서 $i = 1, 2, 3, 4$ 이다.

$$v_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{-u_i}{z_{si} - z_i} \leq 0 \\ v_{imax} & \text{if } \frac{-u_i}{z_{si} - z_i} \geq v_{imax} \\ \frac{-u_i}{z_{si} - z_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

스카이 훅 개념의 반능동 현가장치는 앞에서 언급한 스카이훅 능동 제어게인 \mathbf{K} 에 의해 계산된 제어력 중에서 흡수력에 해당하는 제어력만을 발생시키는 제어기법이다. 달리 표현하면, 스카이훅 능동 제어력은 질량의 절대 속도에 의해서 나오는 값이고 스카이훅 반능동 현가장치의 댐핑계수는 스카이훅 능동 제어력을 기준으로 해서 양의 댐핑계수 값만을 산출하는 것이다. 반능동 현가장치에서 요구되는 댐핑 계수를 계산하는데 필수적인 현가의 상대속도에 대한 데이터는 계측된 절대 속도값들을 이용해서 각 상대속도 값을 얻을 수 있다. 그러므로 이 시스템에서도 스카이훅 능동 제어기와 마찬가지로 7개의 속도센서만 있으면 시스템의 구현이 가능하다. On-off 제어기는 자세 제어나 빠른 속도 차량의 승차감 제어에서 상대적으로 적은 비용과 간편한 설치로 그 효과를 볼 수 있는 제어기법이다. 제어 방법으로는 on일 때 댐핑 계수 $v=2000$ [N·sec/m]이고 off일 때 $v=500$ [N·sec/m]이다. 아래 알고리즘은 요구되는 댐핑 계수를 구해서 on-off를 결정하는 로직이다. 중간 값을 기준으로 on-off를 결정하면 그 경계 지점에서 너무 자주 변하는 문제가 발생할 수 있으므로 다음과 같은 로직을 만들었다.

$$\text{if } v_{i-1} = \text{off}, \\ \text{if } d_i > 1100, v_i = \text{on} \\ \text{otherwise } v_i = \text{off} \\ \text{otherwise} \\ \text{if } d_i < 700, v_i = \text{off} \\ \text{otherwise } v_i = \text{on} \quad (16)$$

여기서 d_i 는 현시점에 요구되는 댐핑 계수값이고 v_{i-1} 바로 전상태의 댐핑 계수이다. 반응동 현가장치의 주파수 응답특성곡선은 시간영역에서 각 주파수에 따른 삼각함수 파형 입력을 적용해서 발생하는 출력이 정상상태에 도달했을 때 입력과 출력의 진폭 비를 계산하여 얻을 수 있다. 히빙 입력은 4개의 위상 차 없는 삼각함수 입력을 적용하고 롤링 입력은 좌우 입력에 180도의 위상 차를 그리고 피칭 입력은 앞뒤 입력에 180도 위상 차를 적용한다.

V. 결과 분석

1. 뱀프 입력에 대한 차량의 반응

10 m/sec의 속도로 주행하는 차량의 오른쪽 바퀴에 폭 1m 높이 0.2m의 뱀프입력이 적용되었을 때 각 제어 로직에 따른 시스템의 반응을 그림 2, 3, 4에서 보여준다. 그림 2는 수동 현가장치 대비 능동 현가장치 및 스카이 훅 능동

현가장치의 상대적인 성능 향상의 정도를 보여준다. 능동 시스템의 반응에서 승차감 성능에 해당하는 히빙, 롤링, 피칭 가속도의 크기는 많이 줄어든 반면 현가 상대변위와 타이어 변위는 상대적으로 커졌다. 현가의 상대변위는 주어진 범위 내에서 충분히 활용하는 것이 필요하지만 바텀밍(bottoming)이 발생하면 승차감에 치명적인 영향을 미치므로 오버슛(overshoot)은 절대적으로 줄여야하는 특성이 있다. 반면에 타이어의 접지력은 변화량이 적은 것이 안정성이 높으므로 RMS값이 커지면 주행안정성은 떨어진다. 그림 3은 수동 현가장치에 대한 반응동 현가장치들의 성능 차이를 보여주고 있다. 연속가변 댐퍼에 의한 반응동 시스템의 전상태 피드백 제어기와 스카이훅 제어기가 거의 흡사한 반응을 나타내고 있다. 이는 승차감을 위한 제어기 설계에서는 속도성분이 위치성분에 비해서 제어력에 훨씬 많은 영향을 미치기 때문에 위치성분을 무시해도 된다는 사실이다.

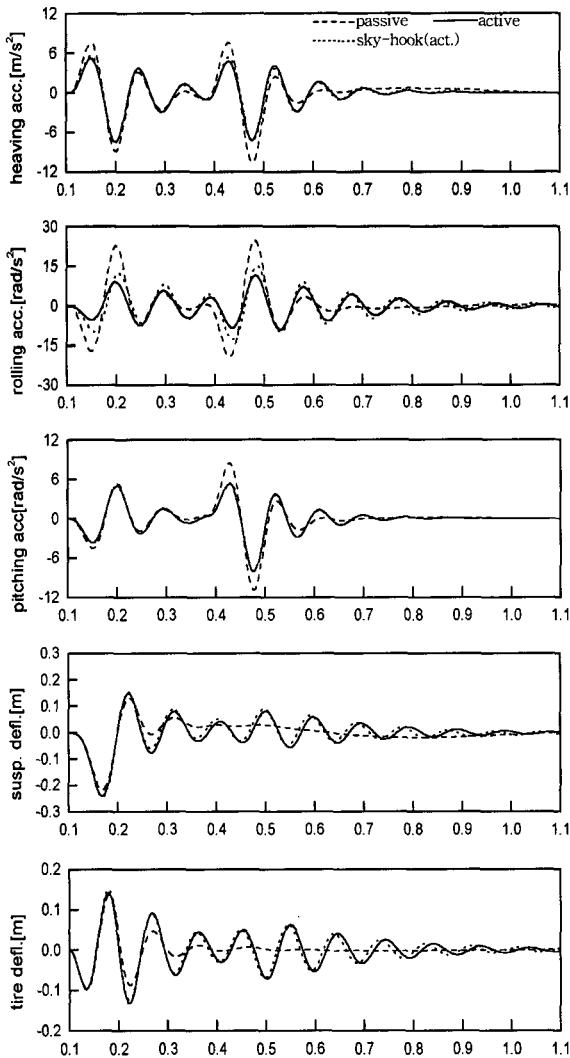


그림 2. 10m/s의 속도로 달리는 차의 오른쪽 바퀴에 뱀프가 입력되었을 때 능동 시스템의 반응.

Fig. 2. Active system responses when right side of the vehicle travels over a bump with 10m/s speed.

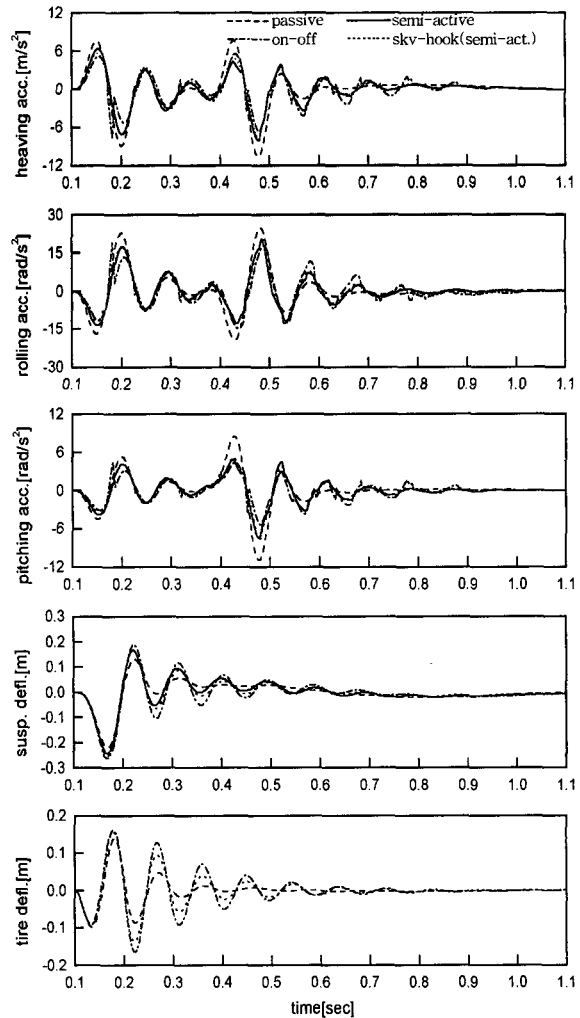
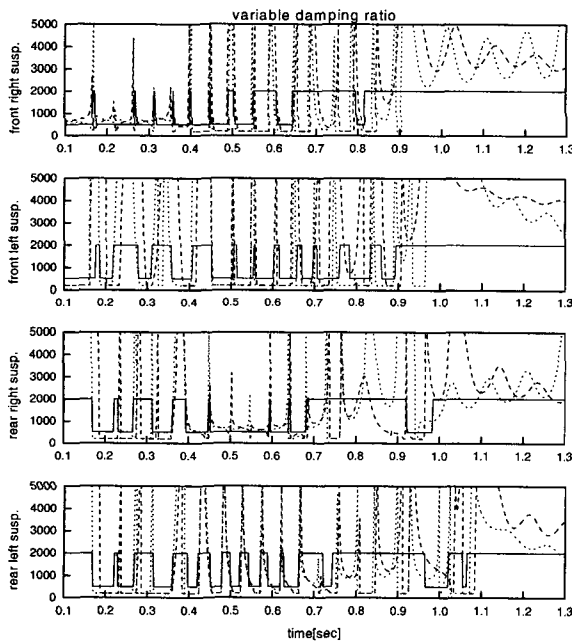


그림 3. 10m/s의 속도로 달리는 차의 오른쪽 바퀴에 뱀프가 입력되었을 때 반응동 시스템의 반응.

Fig. 3. Semi-active system responses when right side of the vehicle travels over a bump with 10m/s speed.

On-off 시스템의 가속도 성분에서 절대 크기는 수동형에 비해 작아졌으나 불연속 점들이 발견되는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 승차감에 나쁜 영향을 줄 것으로 예측된다. 일반적으로 승차감의 정도를 표현할 때는 상하로 작용하는 가속도 즉 힘의 절대량으로 표현하지만 힘의 변화가 심해지면 그 역시 승차감에 나쁜 영향을 줄 것으로 판단되기 때문이다.

그림 4에서 on-off 댐퍼를 살펴보면 범프를 지나가는 오른쪽 현가의 댐핑 계수가 왼쪽 현가의 댐핑 계수에 비해서 소프트한 상태를 많이 유지하는 것을 볼 수 있다. 또한 전상태 피드백 반능동과 스카이훅 반능동 시스템은 성능은 거의 같으나 댐핑값의 변화는 상당한 차이를 가지면서 변화하는 것을 볼 수 있다. 연속가변 댐퍼의 변화값을 보면 순간적으로 자주 점프하는 것을 볼 수 있고 거의 최저점과 최고점 또는 일정한 값 이상에 이르는 상태가 많다는 것을 알 수 있다. 중간 상태에 머무는 상황이 드물기 때문에 실제 시스템의 구현에 있어서는 on-off 댐퍼를 사용해도 상당한 효과를 기대할 수 있을 것이다. 댐퍼의 반응시간이 상당히 늦다는 단점도 연속 가변 댐퍼의 성능을 많이 떨어뜨릴 것이다.



- a) — : on-off 현가 시스템
- a) — : on-off suspension system
- b) - - - : 전상태 피드백 반능동 시스템
- b) - - - : full state feedback semi-active system
- c) ····· : 스카이훅 반능동 현가 시스템
- c) ····· : sky-hook semi-active suspension system

그림 4. 10m/s 속도로 주행하는 차의 오른쪽 바퀴에 범프가 입력되었을 때 각 현가의 댐핑값 변화.

Fig. 4. Damping variation of the each suspension when right side of the vehicle travels over a bump with 10m/s speed.

2. 성능지수 비교 평가

차량이 일반 아스팔트 노면 위를 20m/sec의 속도로 달릴 때의 각 제어기에 따른 시뮬레이션 결과가 표 2에 보여 준다. 승차감 성능부분인 허빙, 롤링, 피칭 가속도들의 RMS값을 살펴보면 수동형에 비해서 각 시스템의 성능 향상 정도를 알 수 있다. 특히 중요한 사실은 롤링 가속도가 수동형에 비해서 능동시스템이 급격히 작아진다는 사실이다. 이 결과에서도 스카이훅 제어기가 전상태 피드백 제어기의 성능을 거의 따라감을 볼 수 있다. 특히 능동형보다 반능동형에서 그러한 경향이 뚜렷하다.

표 2. 승차감 향상을 목적으로 설계된 제어기들에 의한 아스팔트 노면 입력에 대한 시스템 반응에서 성능지수의 RMS값.

Table 2. RMS values in performance indices obtained from system responses to the asphalt road input by means of the controllers designed with ride comfort preference.

control logic performance index	Road data : Asphalt random input					
	Pass.	Active	Semi-active	Sky-hook (active)	Sky-hook (semi.)	On-off
$E(z_c^2)$	100	33.6	41.3	40.3	45.4	50.7
$E(\ddot{\theta}^2)$	100	9.3	23.6	17.7	25.6	38.7
$E(\ddot{\phi}^2)$	100	50.2	55.9	52.6	57.2	64.2
$E([z_{s1} - z_1]^2)$	100	178.7	167.5	174.7	165.6	185.0
$E([z_{s2} - z_2]^2)$	100	156.9	141.1	166.7	158.2	171.7
$E([z_{s3} - z_3]^2)$	100	263.4	228.5	167.1	166.7	194.8
$E([z_{s4} - z_4]^2)$	100	232.4	223.0	194.5	201.4	248.8
$E([z_1 - z_{01}]^2)$	100	133.5	127.5	130.4	126.2	129.2
$E([z_2 - z_{02}]^2)$	100	127.5	119.3	129.3	125.3	128.3
$E([z_3 - z_{03}]^2)$	100	141.9	133.2	117.3	118.4	124.8
$E([z_4 - z_{04}]^2)$	100	161.9	157.1	156.1	154.9	168.3
J_{avg}	100	49.1	56.4	52.5	57.2	67.5

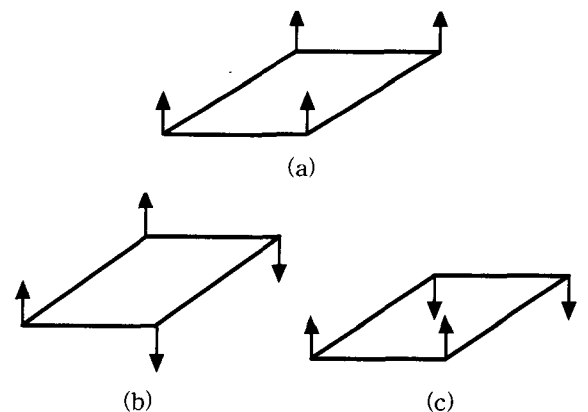


그림 5. 노면 외란의 형태. (a) 허빙 입력, (b) 롤링 입력 (c) 피칭 입력.

Fig. 5. Types of road disturbance. (a) Heaving input, (b) Rolling input, (c) Pitching input.

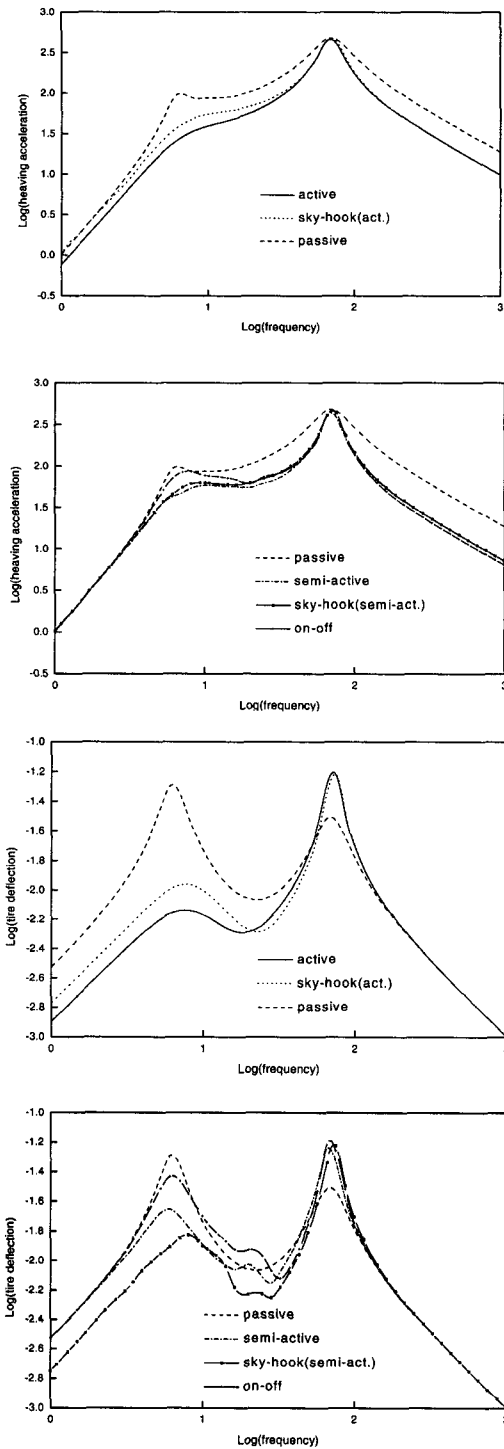


그림 6. 히빙 입력에 대한 차체 히빙 가속도와 타이어 변위의 주파수 특성.

Fig. 6. Frequency characteristics for heaving acceleration of the body and tire deflection under the heaving input.

3. 주파수 특성곡선

주파수 영역에서의 성능 평가는 합축된 많은 정보를 얻을 수 있다. 선형시스템인 능동형은 전달함수를 이용해서 주파수 특성곡선을 얻을 수 있는 반면 반응동형은 비선형

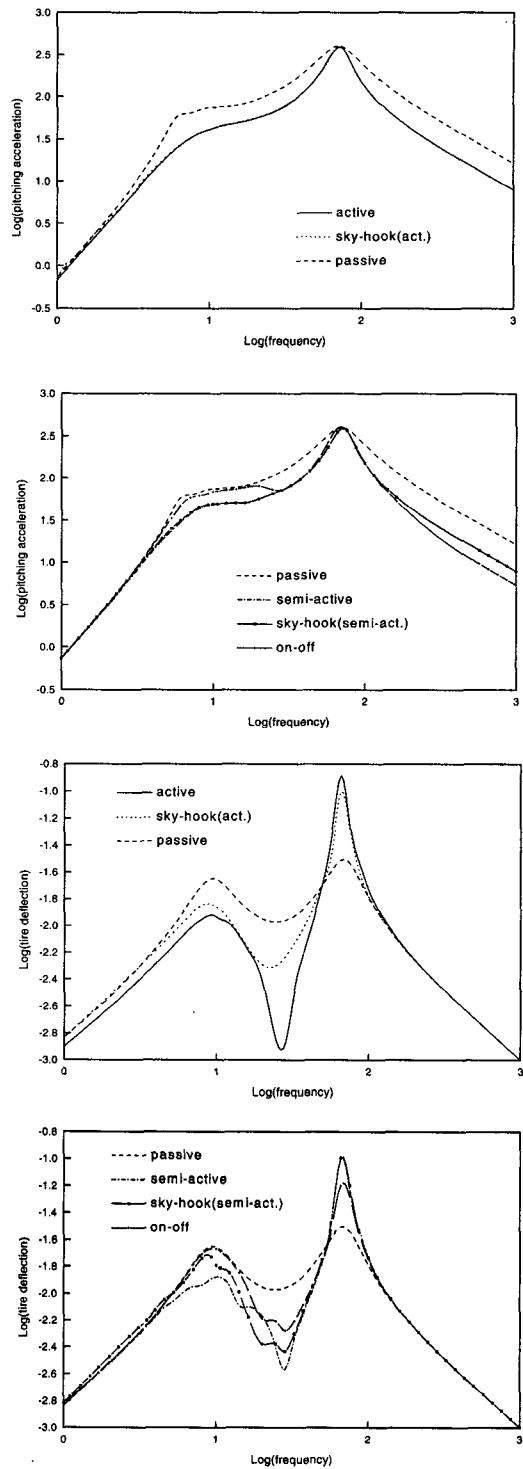


그림 7. 롤링 입력에 대한 차체 롤링 가속도와 타이어 변위의 주파수 특성.

Fig. 7. Frequency characteristics for rolling acceleration of the body and tire deflection under the rolling input.

이기 때문에 시간영역에서 입력과 출력의 진폭비를 이용해서 구하였다. 그림 6, 7, 8의 상단 그림은 전달함수를 통해서 얻은 수동형과 능동형, 스카이훅 능동형 현가장치 주파

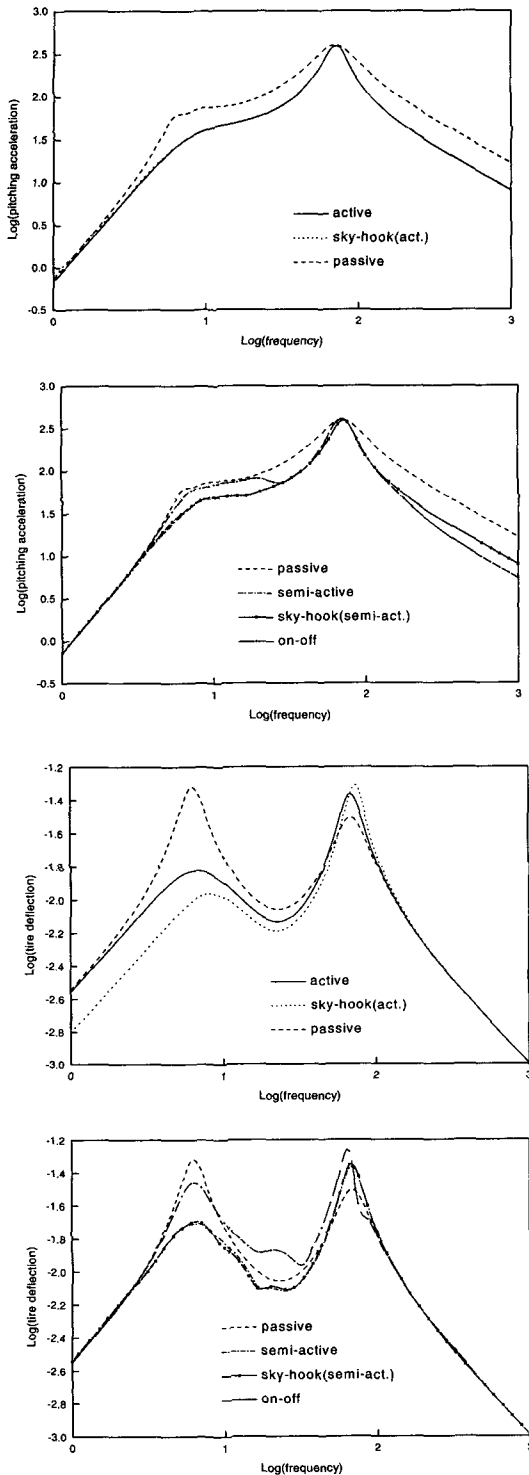


그림 8. 피칭 입력에 대한 차체 피칭 가속도와 타이어 변위의 주파수 특성.

Fig. 8. Frequency characteristics for pitching acceleration of the body and tire deflection under the pitching input.

수 특성곡선들이다. 하단 그림은 시간영역에서 삼각함수 파형을 입력한 후 정상상태에 도달했을 때 입력과 출력의 진폭비를 추출하여 그린 그래프이다. 그림 6은 4개의 바퀴에 똑같은 위상의 삼각함수 파형, 즉 히빙(heaving) 입력

을 적용하여 차체 무게중심의 히빙 가속도와 타이어 변위 주파수 특성곡선을 찾아내었다. 그림 7은 좌우에 180도 위상 차를 주어 롤링 입력을 만들고 그에 대한 차체의 롤링 가속도와 타이어 변위 주파수 특성곡선을 구했다. 그림 8은 전후로 180도 위상 차를 주어 피칭 입력을 만들고 그에 대한 시스템의 반응들 중에서 피칭 가속도와 타이어 변위들을 비교하였다.

능동형과 스카이훅 능동형이 히빙과 피칭 가속도 특성에서는 거의 같으며 롤링 특성에서는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 주파수 응답곡선에서도 승차감 향상을 위한 제어기 설계시 스카이훅 제어기의 우수함을 입증한 것이다. 반능동 현가장치에서는 전상태 피드백과 스카이훅 제어기의 주파수 특성곡선이 거의 같다. 그러나 on-off 시스템은 많은 차이가 있다. 주목할 사항은 높은 주파수에서는 on-off 시스템의 승차감 성능이 다른 반능동 현가장치에 거의 접근한다고 말할 수 있다. 이는 빠른 속도의 차량에서는 on-off 시스템이 효율적일 수 있음을 간접 시사한다.

VI. 결론

전차량 모델을 근거로 능동형과 반능동 현가장치의 승차감 향상을 위한 제어기들을 설계하여 평가해 본 결과 스카이훅 제어기는 거의 전상태 피드백 제어기의 성능에 접근함을 알 수 있다. 더불어서 능동형에서의 스카이훅보다는 반능동형에서의 스카이훅 제어기가 더욱 전상태 피드백 제어기의 승차감 성능에 접근함을 볼 수 있었다. 스카이훅 댐퍼의 장점은 타이어의 변위나 노면의 굴곡같이 계측하기 어려운 상태 변수를 제외하고 제어력을 계산해도 승차감 향상을 위한 제어에는 상당한 효과가 있다는 것이다. 이 논문에서 제시한 전차량에서 스카이훅 제어기에 요구되는 센서는 7개이다. 하지만 주행안전성 향상을 위한 제어에는 효과가 현저하게 떨어질 것으로 예상된다. 한편 시간지연이나 요구되는 검출기등 시스템을 구현하는 측면에서 고려할 때, on-off 제어기는 빠른 속도의 차량에서 효과적일 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 윤일중, 임재필, 신휘범, 이진규, 신민재, "1/2 체도차량에 대한 반능동 현수장치 제어 알고리즘들의 성능평가", 한국자동차공학회 추계학술대회, 2000.
- [2] 홍예선, 황요하, 김동윤, 김영범, 심재진, "승용차용 능동제어식 현가시스템의 개발", 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 53-70, 1993.
- [3] 송동우, 심정수, 정남훈, "차량 능동 현가시스템의 자세 제어 알고리즘 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회, pp. 447-453, 1996.
- [4] 박종현, 김영석, "차량의 능동형 현가장치를 위한 강인한 H^∞ 제어기 설계", 제어·자동화·시스템공학논문지, vol. 6, no. 2, pp. 146-154, 2000.
- [5] R. M. Chalasani, "Ride performance potential of active suspension systems - Part II: Comprehensive analysis based on a full-car

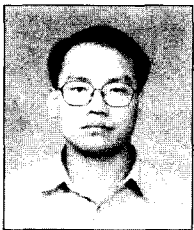
model”, *ASME Monograph*, AMD-vol. 80, pp. 205-234, 1986.

- [6] 광병학, 박영진, “능동형 현가시스템을 위한 모우드 SKY-HOOK 감쇠 제어기”, 한국자동차공학회 추계학술대회, 1993.
- [7] I. Youn, “Optimal control of semi-active automobile suspension including preview information”, Ph.D dissertation, State University of New York at S.B., 1992.

기호

a : lateral distance from front right suspension to sprung mass center
 b : lateral distance from front left suspension to sprung mass center
 bi : ith suspension damping coefficient
 c : longitudinal distance from front suspension to sprung mass center
 d : longitudinal distance from rear suspension to sprung mass center
 e : lateral distance from rear right suspension to unsprung mass center

fi : interacting force between sprung mass and each unsprung mass
 g : lateral distance from rear left suspension to unsprung mass center
 I : roll moment of inertia of rear axle
 Ix : roll moment of inertia
 Iy : pitch moment of inertia
 ki : ith suspension stiffness
 kti : ith tire stiffness
 M : sprung mass
 m : rear unsprung mass
 m1 : right front unsprung mass
 m2 : left front unsprung mass
 ui : ith control force
 vi : ith variable damping coefficient
 zc : vertical position of sprung mass center
 zi : vertical position of unsprung mass
 zoi : vertical position of ith tire
 zsi : vertical position of sprung mass at four corners
 θ : roll angle of sprung mass
 φ : pitch angle of sprung mass
 ψ : roll angle of rear axle
 ρi : weighting factors in performance index



윤 일 중

1961년 6월 7일생. 1987년 한양대 기계공학과 졸업. State University of New York at Stony Brook 석사(1988), 동대학 박사(1992). 동대학 강사(1993). 1994년~1995년 현대자동차 근무. 1995년~현재 경상대학교 수송

기계공학부 조교수. 관심분야는 능동현가장치, 로봇 시스템의 기구학적 해석 및 제어, VTOL기의 설계 및 제어.



임 제 필

1975년 2월 15일생. 2000년 경상대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사과정(현재), 관심분야는 차량동역학 및 제어.