

차량 능동 현가장치 용 수압 액추에이터에 대한 비선형 제어

천종민, 김석주, 이종우, 김춘경, 권순만  
한국전기연구원

Nonlinear Control of a Hydraulic Actuator for Vehicle Active Suspensions

Jong-Min Cheon, Seog-Ju Kim, Choon-Kyung Kim, Jong-Moo Lee and Soonman Kwon

**Abstract** - In this paper, we apply sliding control law to a nonlinear electro-hydraulic suspension system. The force the actuator must track is determined by the skyhook control law and the desired force value varies according to the road situation. The road frequencies can inform us of the current road situation. Detecting the road frequencies, we use the Fourier Transform.

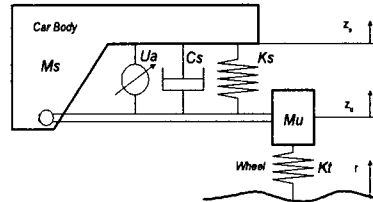


그림 1. 1/4 차량 능동 현가장치 모델

1. 서 론

차량 현가장치의 설치 목적은 크게 두 가지로 구분되는데 첫째는 불규칙한 도로에 의한 수직 방향의 힘을 효과적으로 억제하여 승차감을 향상시키고, 둘째는 타이어와 도로 사이의 접지면을 증대시켜 조종 성능과 주행 안정성을 향상 시키며 동시에 과도한 현가편차(suspension travel)로 인한 차체 충격을 감소하는 것이다.

고정된 설계상수(스프링, 댐퍼 등)로만 구성된 수동 현가장치(passive suspension)는 가변적인 주행환경에 능동적으로 대처할 수 없다. 또 일반적으로 승차감과 현가편차 사이에 상충관계가 존재하는데, 수동 현가장치는 이들 사이의 적절한 상호 타협만을 고려하는데 불과하다. 이러한 수동 현가장치의 단점들은 비록 고비용에 에너지 소비가 크지만 능동 현가장치(active suspension)를 도입하면 해결할 수 있다[1].

본 논문에서는 스카이훅 제어 법칙[2],[3]을 사용하여 앞에서 설명한 현가장치의 목적을 달성하도록 능동 현가장치 제어를 설계한다. 차량 능동 현가장치에 설치되는 수압 액추에이터(Hydraulic Actuator)는 비선형 시스템이므로[1],[3] 스카이훅 제어 법칙으로 계산된 액추에이터 출력 기준값을 추종하기 위하여 슬라이딩 제어 법칙을 사용하여 액추에이터 입력값을 결정한다[3].

스카이 훅 제어 법칙은 저주파의 노면 입력에서는 승차감과 현가편차에서 우수한 성능을 가지지만 어떤 제어 기로도 승차감을 개선할 수 없는 wheel-hop 모드[4] 근처의 고주파 영역으로 근접할수록 승차감과 현가편차 모두에서 수동 현가장치와 차이를 보이지 않으므로 이중 스카이 훅 제어 법칙[5]으로 변환하여 현가편차를 줄이도록 제어 목적을 수정한다.

노면 주파수에 따라 스카이 훅 제어 법칙이 변해야 하므로 노면 주파수를 파악하기 위하여 센서로 측정된 현가편차 값을 이용하여 Fourier 변환을 통해 노면 주파수를 읽는다.

2. 본 론

2.1 능동 현가장치 모델

그림 1에서는 1/4 차량 모델을 바탕으로, 수동소자들로 인 스프링- 댐퍼와 병렬로 능동 액추에이터 설치한 능동 현가장치 모델을 보여주고 있다.

그림 1의 모델에서 상태변수들을  $x_1 = z_s$ ,  $x_2 = \dot{z}_s$ ,  $x_3 = z_u$ ,  $x_4 = \dot{z}_u$ ,  $x_5$ (액추에이터 부하 압력) 그리고  $x_6$ (액추에이터 스톱플 변위)로 설정하여 세운 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{M_s} [K_s(x_1 - x_3) + C_s(x_2 - x_4) - Ax_5] \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{M_u} [K_s(x_1 - x_3) + C_s(x_2 - x_4) - K_t(x_3 - r) - Ax_5] \\ \dot{x}_5 &= -\beta x_5 - aA(x_2 - x_4) + \gamma x_6 \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_6)x_5} \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{\tau} (-x_6 + u) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $u$ 는 액추에이터 입력된 서보밸브 입력이다. 시뮬레이션을 위한 파라미터 값들은 다음과 같다.

표 1. 수압 액추에이터를 가지는 능동 현가장치 파라미터

$M_s$	290 kg	$A$	$3.35e-4 \text{ m}^2$
$M_u$	59 kg	$a$	$4.515e13 \text{ N/m}^5$
$C_s$	3,000 N/m/sec	$\beta$	1.00
$K_s$	16,812 N/m	$\gamma$	$1.545e9 \text{ N/(m}^5\text{)}^2 \text{ kg}^{-1/2}$
$K_t$	190,000 N/m	$P_s$	10,342,500 Pa

2.2 제어기 설계

2.2.1 제안된 제어 기법

서론에서도 언급하였듯이 기존의 스카이 훅 제어 기법 [2],[3]은 저주파 노면 입력에서 승차감과 현가 편차에서 우수한 성능을 가지지만 고주파 영역으로 갈수록 수동 현가장치와 성능 차이가 없다. 본 논문에서는 저주파 영역에서는 스카이 훅 제어 기법을 사용하여 승차감을 개선하고 wheel-hop 모드[4]에 의하여 승차감 개선이 불가능한 고주파 영역으로 갈수록, 승차감에서는 손해지만 현가 편차 진폭을 줄여서 차 부품을 보호하는 이중 스카이 훅 제어 기법[5]을 적용하여 주파수 영역 별로 제어 목적을 달리하는 제어 기법을 제안하였다.

그림 2는 노면 입력에 대한 승차감 및 현가 편차 전달 함수의 주파수 응답을 각 제어 기법 별로 보여 준다.

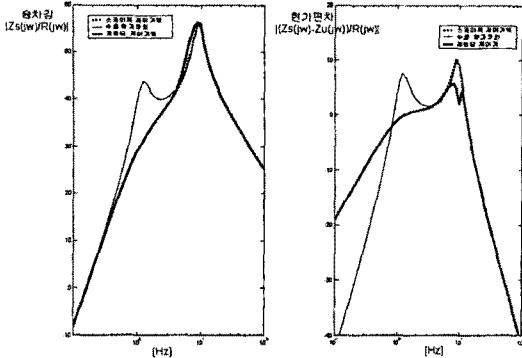


그림 2. 도로 입력에 대한 승차감(左)과 현가 편차(右) 전달함수 주파수 응답

스카이 훅 제어기법에 의한 액추에이터 출력 힘은  $F_{sky} = -C_{sky}x_2$ 이며 이중 스카이 훅 제어기법에 의한 출력 힘은  $F_{sky} = -C_{sky}x_2 + C_{sky}x_4$ 이다. 제안된 제어기법에서는 액추에이터 출력 힘은  $F_{desired} = -C_{sky}x_2 + \rho C_{sky}x_4$ 로 하여  $\rho$ 값에 따라 스카이 훅 제어와 이중 스카이 훅 제어기를 옮겨가도록 하였다.  $\rho$ 는 노면 주파수가 4Hz(스카이 훅 제어기 성능이 수동 현가장치와 차이가 없어지기 시작하는 주파수) 이하에서는 0이고 4Hz를 초과할 때 증가하기 시작하여 wheel-hop 주파수 근방인 10Hz에서 최대 1까지 증가한다. 그리고 10Hz 이상에서는 다시 0이 되어 스카이 훅 제어기로 복귀한다. 그림 2의 제안된 제어기법에 의한 주파수 응답(굵은 실선)에서 보듯이 저주파 영역에서는 승차감을 우선 개선하고 고주파 영역에서는 스카이훅 제어기법과 승차감을 비슷하게 유지하면서 대신 현가 편차를 줄여서 차 부품을 보호하는 승차감과 현가 편차 사이의 상충관계를 전 주파수 영역에서 잘 고려한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

### 2.2.2 노면 주파수 검출

2.2.1 절에서 도입한  $\rho$ 는 노면 주파수에 따라 변하는 값으로 이를 위하여 노면 주파수를 검출할 필요가 있다. LVDT 센서를 이용하여 측정된 차체변위와 차축변위의 차이인 현가 편차 값을 이용하여 Fourier 변환을 통해 노면 주파수를 검출한다. 파워 스펙트럼이 가장 큰 지배 주파수를 찾는 방법으로 노면 주파수를 검출한 결과를 다음의 그림 3에서 보여 준다.

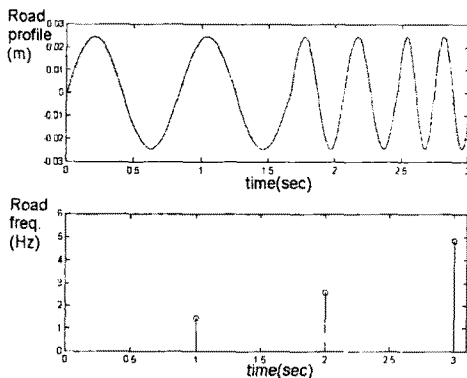


그림 3. Fourier 변환으로 검출한 노면 주파수

### 2.2.3 기준 힘 추종

2.2.1 절에서 제안하는 제어 기법을 통해 정해지는 액추에이터 출력의 기준 힘은  $F_{desired} = -C_{sky}x_2 + \rho C_{sky}x_4$  ( $0 < \rho < 1$ )으로 정해진다. 이 기준 힘을 추종하기 위하여 본

논문에서는 슬라이딩 제어기[3]를 사용하였다.

슬라이딩 제어기는 기본적으로 비선형 시스템에 대하여 변환 선형화하는 형태이다. 예를 들어서 다음과 같은 일차 비선형 시스템이 주어진다고 할 때 그 입력은  $u$ 이고 출력  $y=x(t)$ 이다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

식 (2)의 입력을 다음과 같이 구성하면

$$u = \frac{1}{g(x)} (-f(x) + v) \quad (3)$$

결과적으로 식 (2)는  $\dot{x} = v$ 의 형태로 선형화된다. 여기서  $v$ 는 원하는 시스템 성능을 위하여 선택하는 입력의 설계 값이다.

강인한 변환 선형화 제어기를 설계하기 위하여 슬라이딩 제어 기법을 도입한다. 실제 출력과 원하는 출력 사이의 오차를 가지고 슬라이딩 평면을 정의하면 식 (4)와 같다.

$$s(x, t) = x_{actual} - x_{desired} \quad (4)$$

시스템이 강인성을 만족시키려면 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} s^2 \right) = s \dot{s} \leq -\eta s^2, \quad \eta > 0 \quad (5)$$

식 (5)의 조건을 만족시키기 위하여 입력을 구할 때 식 (3)의  $v$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$v = -Ks + \dot{x}_{desired}, \quad K \geq \eta \quad (6)$$

앞 과정의 식 (2)-(6)을 능동 현가장치의 비선형 수압 액추에이터에 적용한다.

먼저 식 (1)의 로드 압력 관련 비선형 식 (7)에 대하여

$$\dot{x}_5 = -\beta x_5 - \alpha A(x_2 - x_4) + \gamma x_6 \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_6)x_5} \quad (7)$$

2.2.1 절에서 정의된 액추에이터 출력 힘  $F_{des}$ 를 추종하도록 슬라이딩 평면을  $s_1 = F_{des}/A - x_5$ 로 하면  $v_1 = -K_1 s_1 + \dot{x}_{5, desired}$ 이 되고 식 (3) 형태로 식 (7)의 원하는 입력  $x_{6, desired}$ 를 구한다.

$$x_{6, desired} = \frac{1}{\gamma \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_6)x_5}} (\beta x_5 + \alpha A(x_2 - x_4) + \dot{x}_{5, desired} - K_1 s_1) \quad (8)$$

이제 식 (1)의 서보 밸브 입력( $u$ )과 스톱 변위 출력( $x_6$ )에 관한 식 (9)에 대하여

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{\tau} (-x_6 + u) \quad (9)$$

식 (8)에서 주어진  $x_{6, desired}$ 를 추종하기 위하여 슬라이딩 평면을  $s_2 = x_{6, desired} - x_6$ 로 하면  $v_2 = -K_2 s_2 + \dot{x}_{6, desired}$ 이 되고 식 (3) 형태로 식 (9)의 원하는 입력  $u$ 를 구한다.

$$u = x_6 + \tau (\dot{x}_{6, desired} - K_2 s_2) \quad (10)$$

### 2.3 시뮬레이션

제안된 제어기의 성능을 평가하기 위하여 표 1에 주어진 수압 액추에이터 능동 현가장치 파라미터들을 가지고 기타 제어기와 비교하는 시뮬레이션을 시행하였다. 비교 대상은 액추에이터가 없는 능동 현가장치와 기존의 스카

이후 제어기이다.

2.2.1 절에서 제안된 기준 힘을 계산하기 위해서는  $x_2$ 와  $x_4$ 값이 필요하다. 이들은 차체와 차축에 설치된 가속도 센서(accelerometer)를 통해 측정된  $\ddot{z}_s = \ddot{x}_2$ 과  $\ddot{z}_u = \ddot{x}_4$ 를 적분하여 구한다.

식 (10)의 시정수  $\tau$ 를 0.003초로 하여 액추에이터 출력에 기준 힘을 추종한 결과를 그림 4에서 보여 준다.

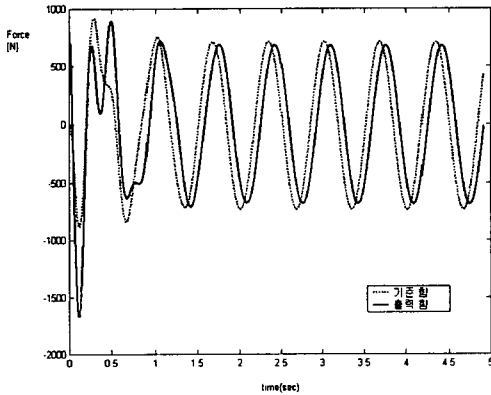


그림 4. 액추에이터 힘 추종 결과

그림 5는 0.0245m의 크기로 저주파수(1Hz-4Hz)를 가진 노면 입력에서의 각 현가장치의 성능을 비교한 것이다. 실선은 제안된 제어기에 의한 능동 현가장치를 사용한 결과이고 점선은 수동 현가장치의 결과이다. 결과에서 볼 때 4 Hz 이하에서 제안된 제어기는 스카이훅 제어 기법을 사용하여 승차감과 현가편차에서 수동 현가장치에 비하여 우수한 성능(둘 다 작을수록 우수)을 발휘하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 중간 주파수(5Hz-7Hz) 영역의 노면 입력에서의 각 현가장치의 성능을 비교한 것이다. 4Hz를 초과하면 제안된 제어기는 이중 스카이훅 제어기를 사용하기 시작하므로 승차감에서 다소 손해를 보지만 스카이훅 제어가 해결하지 못한 현가편차 진폭을 줄여서 차 부품 손실 및 조종 성능을 향상 시킨다.

그림 7은 고주파수(8Hz-11Hz)를 가진 노면 입력에서의 각 현가장치의 성능을 비교한 것이다. 현가장치는 10Hz 근방의 wheel-hop 모드에서는 어떠한 제어기로도 승차감을 개선할 수 없게 된다. 제안된 제어기는 고주파 영역에서 완전한 이중 스카이훅 제어기로 변환되어 승차감 성능을 큰 차이 없이 유지하면서 현가편차 성능 개선에 큰 효능을 보이고 있음을 알 수 있다.

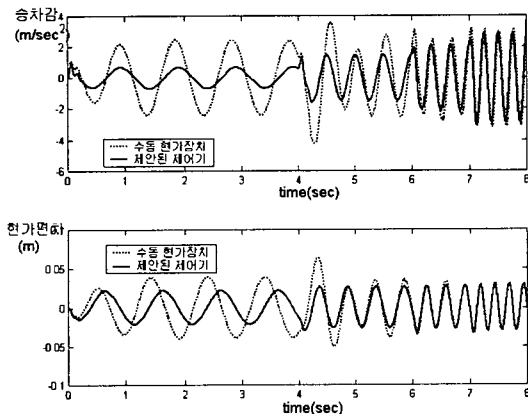


그림 5. 저주파(1Hz-4Hz) 노면 입력에 대한 결과

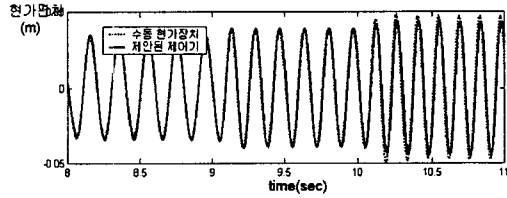
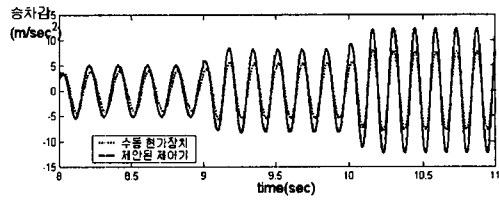


그림 6. 중간 주파수(5Hz-7Hz) 노면 입력에 대한 결과

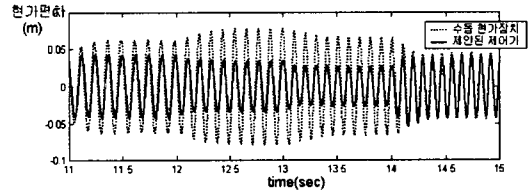
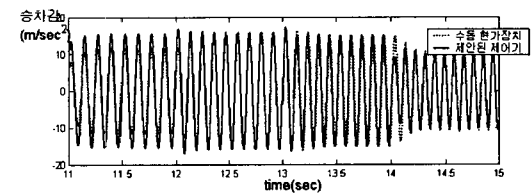


그림 7. 고주파수(8Hz-11Hz) 노면 입력에 대한 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 주행 환경에 적응하여 노면 주파수에 따라서 제어 목적을 달리하는 능동 현가장치 제어기를 제안하였다. 저주파 영역에서는 승차감 개선에 치중하여 그 성능이 우수한 스카이훅 제어기를 사용하고 고주파로 갈수록 현가편차 개선에 목적을 두고 이에 부합한 이중 스카이훅 제어기를 사용하여 전 주파수 영역에 걸쳐서 현가장치의 설치 목적을 만족시켰다. 제안된 제어기법으로 정해진 액추에이터 기준 출력값을 추종하기 위하여 슬라이딩 제어기법을 사용하였고 주행 환경인 노면 주파수를 검출하기 위하여 Fourier 변환을 사용하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. S. Lin and I. Kanellakopoulos, "Nonlinear design of active suspensions," *J. of IEEE Control Systems*, pp. 45- 59, June, 1997.
- [2] Venhovens, "The Development and Implementation of Adaptive Semi-Active Suspension Control," *Vehicle System Dynamics*, 23, pp. 211-235, 1994.
- [3] A. Alleyne and J. K. Hedrick, "Nonlinear adaptive control of active suspensions," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 94- 101, March, 1995.
- [4] C. Yue, T. Butsun, and J. K. Hedrick, "Alternative control laws for automotive active suspensions," *Trans. of ASM E J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 111, pp. 286- 291, June, 1989.
- [5] 우승훈, 류제하, "이중 스카이훅 알고리즘을 사용한 반능동 현가장치의 제어기 설계," 한국 자동차 공학회 1996년도 추계 학술대회 논문집, pp. 583-588.