

# 축소된 전차량 모델을 이용한 현가장치의 통합제어: HILS 및 실차실험

## Integrated Suspension Control Using a Reduced Full-Car Model: HILS and Experiments

. 홍경태\*, 손현철\*, 이동락†, 홍금식\*\*

\* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (Tel: 82-051-510-1481; Fax: 82-051-514-0685; E-mail: hongkt@kebi.com)  
 \*\* 부산대학교 기계공학부 (Tel: 82-051-510-2454; Fax: 82-051-514-0685; E-mail: kshong@hyowon.pusan.ac.kr)  
 † 대우통신㈜ 부산연구소 (Tel: 82-051-510-2454; Fax: 82-051-510-0685; E-mail: drlee@dpi.daewoo.co.kr)

**Abstract:** In this paper, an integrated control of the semi-active suspension system using a reduced full-car model is investigated. By including the reduced full-car dynamics in the control law, the semi-active suspension system is able to control not only the vertical acceleration but also the roll and pitch motions of the car body, which is not possible with a quarter-car model or a half-car model. The damping forces for the semi-active dampers are designed to track the damping forces of the skyhook controller designed from the reduced full car dynamics. Computer simulations and experimental results using a real car are also included.

**Keywords:** Suspension system, reduced full-car model, semi-active damper, sky-hook control.

### 1. 서론

본 논문에서는 조향장치의 영향을 배제한 7자유도의 전차량(full car) 모델에 대한 제어를 차속을 고려하여 연구한다. 자동차의 전차량 동역학을 이용한 반능동 현가장치의 제어는 차체의 수직가속도뿐만 아니라 1/4차량이나 1/2차량모델에서 고려하지 못하는 롤과 피치 운동까지 고려할 수 있다[5]. 전차량 동역학에서 제어입력인 반능동 현가장치의 감쇠력은 승차감 위주의 제어기법인 스카이훅(sky-hook) 제어력을 추종하게끔 설계된다[8]. 스카이훅 제어의 개념은 노면외란에 의한 차체의 수직가속도를 줄이기 위하여 가상적인 기준면에 감쇠기를 설치하는 것이다. 전상태 되먹임 제어와는 달리 스카이훅 제어는 모든 상태변수를 다 알 필요가 없고, 현가장치 상대속도와 차체의 절대속도만으로 구현이 가능하다[2, 5].

이상적인 스카이훅 감쇠력은 차체와 차축 사이에 있는 연속가변댐퍼에 의해 구현이 가능하다. 연속가변댐퍼는 전류의 인가에 따라 상대속도에 대한 감쇠력이 조절가능하므로 물리적인 포화 또는 제어불능이 생기지 않는다면 원하는 감쇠력을 추종할 수 있다. 그러나 연속가변댐퍼는 감쇠계수가 강한 비선형성을 가지므로 제어기의 설계나 필터의 설계에 많은 제약이 가지게 된다[3].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2절에서 반능동 현가장치에 대한 축소된 전차량 모델링을 하고 이에 따른 상태방정식을 살펴본다. 3절에서 스카이훅 제어에 대해 간략히 기술한다. 4절에서 노면의 종류와 차속에 따른 노면의 해석, 그리고 스카이훅 게인과의 연관성을 다룬다. 5절에서는 차속을 고려한 스카이훅 제어의 실차 실험 데이터를 획득 및 분석한다. 마지막으로 6절에서 본 논문의 결론 및 고찰을 제시한다.

### 2. 축소된 전차량 모델 (Reduced Full-Car Model)

조향장치를 고려하지 않은 전차량 모델은 차체와 4개의 차축으로 이루어진다. 차체는 강체이며 롤, 피치 및 수직방향으로만 운동한다고 가정한다. 또한 4개의 차축은 각각 수직방향으로 운동한다. 그러므로 전차량 모델은 7자유도를 가지게 된다. 현가장치는 스프링 및 연속가변댐퍼로 구성된다. 이에 따라 전차량 모델의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$M_s \ddot{p} = -GC^*(\dot{z}_r - \dot{z}_u) - GK_s(z_r - z_u) \quad (1)$$

$$M_u \ddot{z}_u = C^*(\dot{z}_r - \dot{z}_u) + K_{ss}(z_r - z_u) - K_t(z_u - z_r)$$

여기서,

$p = [z_c \ \theta \ \phi]^T \in R^3$ ,  $z_j = [z_{j1} \ z_{j2} \ z_{j3} \ z_{j4}]^T \in R^4$ ,  $j = u, s, r$ 이다. 또한  $z_c$ ,  $\theta$  및  $\phi$ 는 각각 차체의 무게중심에서의 수직변위, 롤 각도 및 피치 각도이며,  $z_{u1}$ ,  $z_{u2}$ ,  $z_{u3}$ ,  $z_{u4}$ 는 현가장치  $i$ 에 대하여 각각 차체의 수직변위, 차축의 수직변위와 노면의 수직변위이다. (1)에서 나머지 행렬들은 다음과 같다.

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{yf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yf} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{yf} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{yf} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -l_f & l_f & -l_r & l_r \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$K_{sr} = \begin{bmatrix} k_f + r_f/2 & -r_f/2 & 0 & 0 \\ -r_f/2 & k_f + r_f/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_f + r_f/2 & -r_f/2 \\ 0 & 0 & -r_f/2 & k_f + r_f/2 \end{bmatrix}$$

$$M_s = \text{diag}(m_s, I_\theta, I_\phi), \quad M_u = \text{diag}(m_f, m_f, m_r, m_r)$$

$$K_{ss} = \text{diag}(k_f, k_f, k_r, k_r)$$

$$C_s = \text{diag}(c_{s1}, c_{s2}, c_{s3}, c_{s4}), \quad C_{sky} = \text{diag}(c_{sky1}, c_{sky2}, c_{sky3}, c_{sky4})$$

(1)에서  $C^*(\dot{z}_r - \dot{z}_u)$ 는 연속가변댐퍼에 의한 감쇠력으로 Fig. 2와 같고,  $f_d^*$ 로 표기하기로 한다. 본 논문에서는  $C^*$  값을 Karnopp의 2인[7]에 의해 제안된 스카이훅 감쇠제어에 의해 설계한다. 또한  $z_r$ 와  $p$ 는 아래와 같은 기구학적 상관관계를 가진다.

$$z_r = G^T p \quad (2)$$

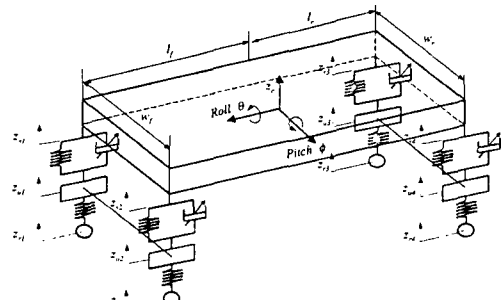


그림 1 전차량 모델의 개략도.  
 Fig. 1 Schematic Diagram of the Full-Car Model.