

횡방향 거동 특성을 고려한 부하모사 시스템 해석

김효준
강원대학교 기계공학과

Analysis of Load Simulating System Considering Lateral Behavior of a Vehicle

Hyo-Jun Kim
Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University

요약 자동차의 과도한 차체 운동과 조종 불안정성을 유발하는 대표적인 외란 입력으로는 운전자에 의해 가해지는 조향 핸들 조작이다. 급격하고 과도한 핸들 조작은 SUV 차량처럼 기하학적 및 동역학적 특성에 따라 차량 전복 현상도 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 이에 대응할 수 있는 제어 시스템의 구조화에 대하여 다음과 같이 기초 연구를 수행하였다. 운전자 조종으로 유발되는 횡방향 거동에 대한 수학적 모델링을 수행하고, 이를 토대로 차체 운동을 제어할 수 있는 제어기를 설계하였다. 파라미터 불확실성으로 인한 모델링 오차에 대해 강건한 제어 성능을 확보하기 위하여 H_{∞} 알고리즘을 적용하였다. 비 연성화된 1/4 차량을 기반으로, 차체에 작용하는 모우멘트에 상응하는 동적 부하를 모사할 수 있는 모델을 제시하였다. 동적 시뮬레이션을 수행하여 부하 모사 모델의 타당성을 파악하였다. 차체-차축-서스펜션-타이어로 조합되는 1/4 실험 차량 장치와 부하 모사 모듈, 서스펜션 제어 모듈 및 Hils 기술을 적용하는 차체 거동 제어 시스템에 대한 프레임워크를 제안하였다.

Abstract The driver's steering wheel maneuver is a typical disturbance that causes excessive body motion and traveling instability of a vehicle. Abrupt and extreme operation can cause rollover depending on the geometric and dynamic characteristics, e.g., SUV vehicles. In this study, to cope with the performance limitation of conventional cars, fundamental research on the structurization of a control system was performed as follows. Mathematical modeling of the lateral behavior induced by driver input was carried out. A controller was designed to reduce the body motion based on this model. An algorithm was applied to secure robust control performance against modeling errors due to parameter uncertainty, H_{∞} . Using the decoupled 1/4 car, a dynamic load simulating model considering the body moment was suggested. The simulation result showed the validity of the load-simulating model. The framework for a lateral behavior control system is proposed, including an experimental 1/4 vehicle unit, load simulating module, suspension control module, and hardware-in-the-loop simulation technology.

Keywords : Steer Maneuver, LB Model, Body Motion Control, LS Model, Hardware-In-The-Loop Simulation

1. 서론

자동차에 입력되는 교란 요인으로는 브레이크 작동,

스티어 핸들 조작, 급속한 풍속 변화, 주행 도로 면의 돌출되거나 함몰된 장애물 등이 대표적이다. 이러한 외란으로 유발되는 차량의 부적절 운동, 과도한 진동 및 그 악

본 논문은 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(620170015)로 연구하였음.

*Corresponding Author : Hyo-Jun Kim(Kangwon National Univ.)

Tel: +82-33-570-6322 email: hjkimm@kangwon.ac.kr

Received February 27, 2019

Revised March 28, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

영향을 저감시키고 안전성을 확보하고자 하는 것은 꾸준히 연구되는 주요 이슈이다.

운전자 조작 및 외란 입력 인자에 대한 차량의 운동 특성에 대한 연구는 차량 및 관련 부품 개발에 있어 핵심적인 부분이다. 자동차의 서스펜션 시스템은 차체를 지지하고 적절한 운동특성을 유지하는 핵심적인 기능을 하며, 스프링-댐퍼-기구부 와 같은 수동형 요소들의 조합적 설계가 적용되고 있다.

이와는 별개로, 전통적인 서스펜션의 기능적 한계를 개선하는 방안으로, 별도의 작동기와 제어시스템으로 구성되는 능동형/반능동형 서스펜션 시스템에 대한 연구가 다양한 제어 이론을 적용하여 진행되어왔다[1-8]. 능동형 시스템은 제어 성능 면에서 많은 장점을 가지지만 소요 비용, 소모 동력 등 현실적 제약점이 있다. 이에 대한 대안으로 MR 댐퍼와 같은 가변형 댐퍼를 이용하는 반능동형 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[9]. 그러나 이러한 연구의 많은 부분이 불규칙한 노면 외란에 대한 진동제어에 편중되어 그 결과가 발표되어왔다.

주행하는 차량에 조향 핸들을 통한 운전자 조종 입력을 가하는 경우, 동역학적 거동의 결과로 횡방향 하중이동(Lateral Load Transfer)이 발생한다. 즉, 선회 외륜측으로 하중이 이동하게 되며, 이에 상응하는 차체의 모우멘트는 서스펜션 시스템의 지지 특성과 밀접한 관계를 나타내게 된다[10]. 현재 시장 규모가 급격히 팽창하는 SUV (Sport Utility Vehicle)의 경우, 기하학적 특성으로 인해, 급격한 조향 조작에서는 차량의 불안정성이 유발되고, 최악의 경우에는 차량 전복(Rollover)이 발생한다. 따라서 이러한 외란 요인에 의한 차량 운동 특성에 대응하는 연구가 요구된다.

본 연구에서는, 운전자의 조향 조작으로 유발되는 차체의 거동을 개선하기 위한 제어 시스템과 이를 구현하기 위한 Hils(Hardware-in-the-loop Simulation) 기술을 기반으로하는 실험적 프레임워크에 대한 기초 연구를 수행하였다.

2. 횡방향 거동 모델

도로상을 일정 속도로 주행하는 자동차의 조향 입력에 의한 차량의 운동을 기술하기 위하여 횡방향 거동 모델(LBM: Lateral Behavior Model)을 다음과 같이 모델링하였다.

좌표계는 차체에 고정된 차량 고정 좌표계(vehicle-fixed

coordinates system)를 적용하고, 차량은 x-z 평면에 대하여 대칭이라고 가정하였다.

차량 무게중심에서의 속도가 V로 일정하다고 하면, 조향계 입력에 의해 관성좌표계에 대하여 요우각속도 r로 회전 할 때 차량 무게중심에서의 횡슬립각 β는 x,y방향 속도 성분 v_x, v_y로부터 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}) \quad (1)$$

일반적인 전륜 조향 차량에서는 전륜만이 좌/우측 타이어가 동일하게 조향되므로, 각 타이어에서의 조향각 δ_i (i=1..4)는 Eq. (2)와 같다.

$$\delta_f = \delta_1 = \delta_2, \quad \delta_r = 0 = \delta_3 = \delta_4 \quad (2)$$

전/후륜에서의 타이어 슬립각은 차체의 롤 운동에 의한 스티어 영향을 포함하면 Eq. (3)과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \beta_f \\ \beta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_f}{V} \\ 1 & -\frac{l_r}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{bmatrix} \phi \quad (3)$$

Where, α_f, α_r denote coefficient of roll effect,

l_f, l_r denote distance from CG to axle

Eq. (3)에서 슬립각이 작고 좌/우측 타이어의 특성이 동일한 것으로 가정하면, 타이어에 작용하는 선회력이 슬립각과 비례하는 것으로 선형화하여 나타낼 수 있다. 따라서 조향 입력에 의해 차량에 작용하는 선회력과 모우멘트 관계를 고려하여 차량의 운동방정식을 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$M(\dot{v} + Vr) + M_s h_s \dot{\phi} = 2K_f(\delta_f + \alpha_f \phi - \beta - \frac{l_f}{V} r) + 2K_r(\alpha_r \phi - \beta + \frac{l_r}{V} r) \quad (4)$$

$$I_z \dot{r} = 2K_f(\delta_f + \alpha_f \phi - \beta - \frac{l_f}{V} r)l_f - 2K_r(\alpha_r \phi - \beta + \frac{l_r}{V} r)l_r \quad (5)$$

$$I_x \dot{p} + M_s h_s(\dot{v} + Vr) = -K_\phi \phi - C_\phi p \quad (6)$$

Where, h_s denotes distance from roll center to CG, K_φ denotes roll stiffness, C_φ denotes roll damping

Eq. (4)-(6)의 운동방정식으로부터 상태 벡터 x_p를 횡속도(lateral velocity), 요우각속도(yaw angular

velocity), 롤각(roll angle), 롤각속도(rollrate)로 선정하고, 전륜의 타이어 조향각을 외란으로, 차체 운동을 제어하기 위한 모우멘트를 제어입력으로 하는 상태방정식은 다음과 같이 Eq. (7), (8) 로 각각 나타낼 수 있다.

$$E\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_o \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_o M_d + \mathbf{L}_o \delta_f \quad (7)$$

$$y = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{D}_p M_d \quad (8)$$

Where, $\mathbf{x}_p = [v \ r \ \phi \ p]^T$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & M_s h_s \\ 0 & I_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ M_s h_s & 0 & 0 & I_x \end{bmatrix}, \mathbf{B}_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_p = [0 \ 0 \ 1 \ 0], \mathbf{D}_p = [0]$$

$$\mathbf{L}_o = [K_f \ K_{f_l} \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{A}_o =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{(K_f + K_r)}{V} & (-MV - \frac{K_{f_l} l_f + K_{r_l} l_r}{V}) & (K_{f \alpha_f} + K_{r \alpha_r}) & 0 \\ -\frac{(K_{f_l} - K_{r_l})}{V} & -\frac{(K_{f_l} l_f^2 + K_{r_l} l_r^2)}{V} & (K_{f \alpha_f} l_f - K_{r \alpha_r} l_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -M_s h_s V & -K_{\phi} & -C_{\phi} \end{bmatrix}$$

3. 차체 운동 제어기 설계

운전자의 조향 핸들 조작으로 인하여 발생하는 차체의 운동을 제어하기 위해서 다음과 같이 차체 운동 제어기(BMC: Body motion controller)를 설계하였다.

제어 알고리즘으로는 파라미터 불확실성에 의한 모델링 오차에 대해서 강건한 제어 성능을 얻을 수 있도록 H ∞ 제어 기법을 적용하였다.

Eq. (7), (8)로 부터 시스템의 전달함수 $P_u(s)$ 와 외란의 전달함수 $P_w(s)$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$P_u(s) = C_p(sI - A_p)^{-1} B_p \quad (9)$$

$$P_w(s) = C_p(sI - A_p)^{-1} L_p \quad (10)$$

Where, $A_p = E^{-1} A_o$, $B_p = E^{-1} B_o$, $L_p = E^{-1} L_o$

가중함수 $W_a(s)$, $W_s(s)$, $W_n(s)$ 를 포함하는 일반화된 제어구조에 대한 식을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{z}(s) \\ y(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & W_a(s) \\ W_s(s) P_w(s) & \mathbf{0} & W_s(s) P_u(s) \\ P_w(s) & W_n(s) & P_u(s) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}(s) \\ u(s) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Where,

$$W_a(s) = D_a + C_a(sI - A_a)^{-1} B_a$$

$$W_s(s) = D_s + C_s(sI - A_s)^{-1} B_s$$

$$W_n(s) = N_w$$

Eq. (11)로 부터 일반화된 플랜트에 대한 상태 방정식과 각각의 행렬은 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + B_1 \mathbf{w} + B_2 u \quad (12)$$

$$\mathbf{z} = C_1 \mathbf{X} + D_{11} \mathbf{w} + D_{12} u \quad (13)$$

$$y = C_2 \mathbf{X} + D_{21} \mathbf{w} + D_{22} u \quad (14)$$

Where, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_a^T \ \mathbf{x}_s^T \ \mathbf{x}_p^T]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_a & 0 & 0 \\ 0 & A_s & B_s C_p \\ 0 & 0 & A_p \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} L_p \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} B_a \\ B_s D_p \\ B_p \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} C_a & 0 & 0 \\ 0 & C_s & D_s C_p \end{bmatrix},$$

$$D_{11} = [\mathbf{0}_{2 \times 2}], \quad D_{12} = \begin{bmatrix} D_a \\ D_s D_p \end{bmatrix}$$

$$C_2 = [0 \ 0 \ C_p], D_{21} = [0 \ N_w],$$

$$D_{22} = [D_p]$$

제어기를 설계하기 위하여 외란-출력 간의 전달함수 $M(s)$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$M(s) = (I + P_u(s) K(s))^{-1} P_w(s) \quad (15)$$

조향 외란에 의한 차체 운동 응답을 억제하기 위해서 다음의 식을 만족하도록 해야 한다.

$$\|W_s(s) M(s)\|_{INF} < 1 \quad (16)$$

외란-제어입력 사이의 전달함수 $N(s)$ 를 다음과 같이 나타내고,

$$N(s) = K(s)(I + P_u(s) K(s))^{-1} P_w(s) \quad (17)$$

파라미터 불확실성으로 인한 모델링 오차를 고려하여 다음과 같이 강건 안정성을 만족하도록 해야 한다.

$$\|W_a(s) N(s)\|_{INF} < 1 \quad (18)$$

Eq. (16), (18)을 만족하도록 혼합감도 문제를 풀면 운전자의 조향 조작으로 인한 차체의 운동을 제어하기 위한 최종 제어기의 구조를 Eq. (19), (20)과 같은 상태방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_K = A_K x_K + B_K \phi \quad (19)$$

$$M_d = C_K x_K + D_K \phi \quad (20)$$

Where, $K(s) = C_K(sI - A_K)^{-1}B_K + D_K$

4. 횡방향 거동 제어 시스템

4.1 부하 모사 모델

자동차에 대한 수학적 모델은 그 목적에 따라 다양하게 적용하고 있다. 그 중, 1/4 차량 모델은 전체 차량을 각각의 차륜을 중심으로 4개의 비연성 모델로 (Decoupled-lumped mass system) 고려한 것이다. 이 모델은 차체, 차축, 서스펜션 시스템 및 타이어를 포함하여 효과적으로 차체 운동을 해석하는 데 적용된다[11]. 특히 차체의 운동을 제어하기 위한 제어 시스템의 설계에 있어서 그 효율성 때문에 적극적으로 활용되고 있다. 그러나 일반적인 1/4 차량 모델은 주행 노면의 불규칙한 수직 형상 입력만을 고려한 거동에 초점을 맞추고 있다. 본 논문에서는 운전자의 조향 외란에 의해 유발되어 차체에 작용하게 되는 동적 하중을 고려하여 횡방향 부하 모사 모델(LSM: Load Simulating Model)을 적용하였다.

주행하는 노면의 수직 외란 z_r 뿐만 아니라 조향 조작 입력으로부터 Eq. (4)-(6)과 연계되는 동적하중 외란 F_{dyn} 을 고려하는 LSM의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (21)의 f_a 는 조향 입력에 의한 차체 거동을 제어하기 위해 서스펜션의 작동기에서 발생시켜야 하는 제어력으로 Eq. (20)로부터 연계된다.

$$\dot{X}_L = A_L X_L + B_L f_a + L_L \dot{z}_r + E_L F_{dyn} \quad (21)$$

Where, $X_L = [z_s - z_u \quad \dot{z}_s \quad z_u - z_r \quad \dot{z}_u]^T$

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k}{m_s} & -\frac{c}{m_s} & 0 & \frac{c}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_u} & \frac{c}{m_u} & -\frac{k_t}{m_u} & -\frac{c}{m_u} \end{bmatrix}, B_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ m_u \end{bmatrix}$$

$$L_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, E_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.2 시뮬레이션

도로상을 주행하는 자동차에서 운전자의 조향 핸들 조작형태는 다양하다. 통상적인 조건에서 입력은 완만하며, 이로 유발되는 차량 운동도 평이하여 운전자의 대응에

큰 차이가 없다. 그러나 급격한 핸들 조작이 요구되는 급박한 상황에서는 운전자의 대응 능력에 따라 사고 발생 유형이 달라지게 된다. 따라서 이러한 조작 조건에서의 제어 시스템의 성능이 중요하게 된다.

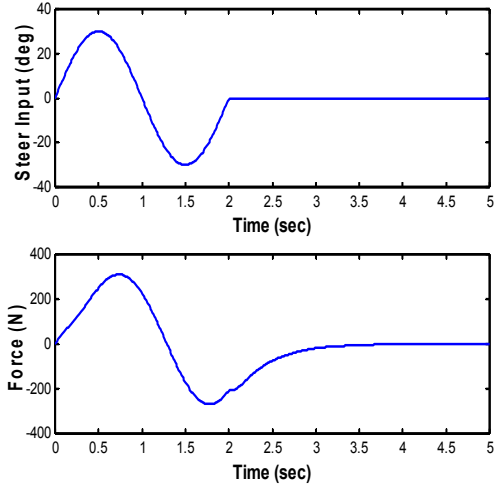


Fig. 1. Driver's steer maneuver and Dynamic force

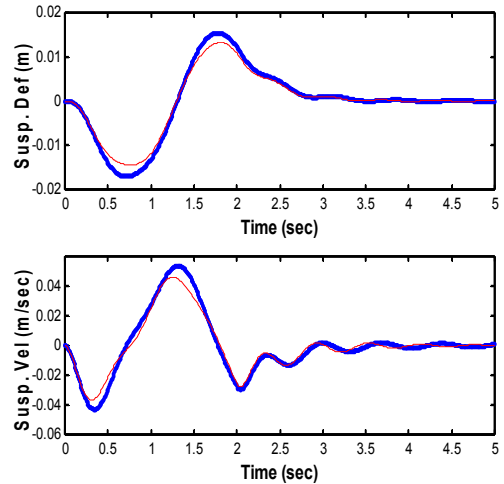


Fig. 2. Comparison of dynamic behavior (line: LBM, bold-line: LSM)

Fig. 1과 Fig. 2는 대표적인 응급 대응 상황에 대한 시뮬레이션 결과이다. 차량 주행 중 전방 차량에서의 낙하물, 야생 동물 도로 침입, 심각한 주행 도로면의 파손부 접근 등의 상황을 고려하였다. 이와 같은 위험물 회피 조작 조건에서의 조향 핸들 입력과 그때 발생하는 LBM을 기반으로 생성된 동적 부하를 Fig. 1에 도시하였다. 이러한 동적 하중에 의해 LSM에서 발생하는 서스펜션 시스

템의 변위와 속도를 LBM의 응답과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 결과에서처럼 부분적으로 미소한 오차가 발생하지만, 전체적 거동의 재현이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

4.2 Hils 시스템

조향 외란에 의한 차체 운동을 제어하기 위해서는 서스펜션에 구현된 제어용 작동 시스템이 필요하다. 이처럼 고안된 서스펜션 제어 모듈과 설계된 제어 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 실험적 평가가 요구된다. 그리고 이를 위해서는 실제 차량에 구현하는 실차 테스트가 필수적이다. 본 연구에서는 조향 외란에 의한 차체 거동 제어 시스템의 실험적 검증을 위해 Hils(Hardware-in-the-loop simulation) 기술을 적용한 구조화 방안을 Fig. 3에 제시하였다.

차량의 동역학적 모델과 제어 알고리즘으로 구성된 소프트웨어 시스템과 1/4 차량 실험 모듈, 부하 모사 모듈 그리고 서스펜션 제어 모듈로 구성된 하드웨어 시스템으로 구성이 된다. 4.1절에 제시한 수학적 LSM은 차체, 차축, 타이어로 구성된 1/4 차량 실험 장치인 하드웨어로 구현되고, 운전자의 조향 조작에 상응하는 차량 동역학 출력의 동적 하중 신호와 제어 알고리즘에서 출력된 제

어 신호는 부하 모사 모듈과 서스펜션 제어 모듈에 각각 전달되어 작동하게 된다. 1/4 차량 실험 장치에서 측정하는 동적 응답 신호는 동역학 제어 부문(Dynamics & Processing Part)에 피드백되어 전체 작동 루프를 구성하게 된다. Fig. 3에 도시한 것과 같이, 제안한 프레임워크의 기반하에, 실제 차량 시험에서 발생할 수 있는 제비용과 위험성을 배제하고 실험실 단위에서 개발, 적용, 평가 과정을 수행할 수 있는 선행 연구 시스템으로 적용(prototyping)할 수 있을 것으로 사료된다. 향후, 이를 구체화하는 상세 설계 연구를 진행할 예정이다.

5. 결론

주행하는 자동차에 가해지는 운전자의 조향 조작으로 유발되는 차체 거동의 제어와 연계된 본 연구의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 횡방향 거동 모델(LBM) 특성을 반영한 부하 모사 모델(LSM)을 제시하였다.
- (2) 부하 모사 모듈과 하드웨어로 구현될 실제 실험 장치와의 모델링 오차에도 강건한 성능을 확보하기 위해 H_{∞} 제어 알고리즘을 적용하였다.
- (3) 운전자의 조향 핸들 조작 조건에서 횡방향 거동 모델과 부하 모사 모델에 대하여 동적 시뮬레이션을 수행하여 구현 타당성을 파악하였다.
- (4) 조향 외란에 의한 차체 운동을 제어하기 위한 선행 연구 시스템 개발 방안으로, 1/4 차량 장치를 기반으로 부하모사 모듈, 서스펜션 제어 모듈 그리고 Hils 기술을 적용한 프레임워크를 제안하였다.

References

- [1] J. Lin, R.J. Lian, "Intelligent control of active suspension systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.58, No.2, pp. 618-628, 2011. DOI : <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2046581>
- [2] H. M. Soliman, A. Benzaouia, H. Yousef, "Saturated robust control with regional pole placement and application to car active suspension", *Journal of Vibration and Control*, Vol.22, No.1, pp. 258-269, 2016. DOI : <http://dx.doi.org/10.1177/1077546314528230>
- [3] H. J. Kim, "Experimental study of active vibration control for trailed two-wheeled device", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,

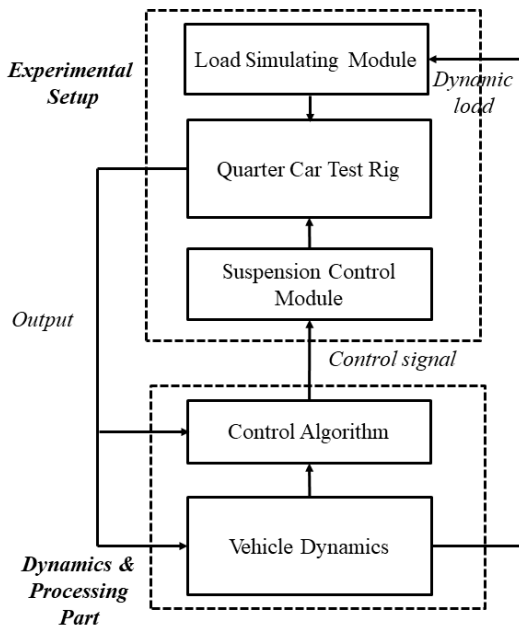


Fig. 3. Configuration of overall lateral motion control system

Vol.13, No.2, pp. 363-369, 2012.

DOI : <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-012-0046-y>

- [4] T. P. J. Sande, I.J.M. Besselink, H. Nijmeijer, "Rule-based control of a semi-active suspension for minimal sprung mass acceleration: design and measurement", *Vehicle System Dynamics*, Vol.54, No.3, pp. 281-285, 2016.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2015.1135970>
- [5] R. J. Lian, "Enhanced adaptive self-organizing fuzzy sliding-mode controller for active suspension systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.60, No.3, pp. 958-968, 2013.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2190372>
- [6] L. Li, F. Liao, "Parameter-dependent preview control with robust tracking performance", *IET Control Theory & Applications*, Vol. 11, Iss. 1, pp. 38-46, 2017.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0361>
- [7] C. Gohrle, A. Schindler, A. Wagner, O. Sawodny, "Road profile estimation and preview control for low-bandwidth active suspension systems", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 2299-2310, 2015.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2014.2375336>
- [8] Z. Xie, P. Wong, J. Zhao, T. Xu, K. Wong, H. Wong, "A noise-insensitive semi-active air suspension for heavy-duty vehicle with an integrated fuzzy-wheel base preview control", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-12, 2013.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1155/2013/953930>
- [9] H. E. Tseng, D. Hrovat, "State of the art survey: active and semi-active suspension control", *Vehicle System Dynamics*, Vol.53, No.7, pp. 1034-1062, 2015.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2015.1037313>
- [10] H. J. Kim, "Robust roll motion control of a vehicle using integrated control strategy", *Control Engineering Practice*, Vol.19, pp. 820-827, 2011.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.04.009>
- [11] A. Hac, I. Youn, "Optimal semi-active suspension with preview based on a quarter car model", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.114, pp. 84-92, 1992.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1115/1.2930239>

김 호 준(Hyo-Jun Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)

• 1988년 1월 ~ 1993년 7월 : 대우중공업 중앙연구소

• 2001년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 기계공학과 교수

〈관심분야〉

동적 시스템의 강건 제어 알고리즘, 고충격 시스템의 안정화 해석, 정밀 시스템의 진동해석/제어