

외란 형상 정보를 활용한 진동제어

김효준
강원대학교 기계공학과

Vibration Control of Vehicle using Road Profile Information

Hyo-Jun Kim

Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University

요약 본 연구에서는 주행 노면의 형상을 재현하는 알고리즘을 기반으로, 외란 형상 정보를 활용한 차량의 진동제어 시스템과 그 결과를 제시하였다. 시스템에 전달되는 외란으로 유발되는 과도한 진동 및 그 영향을 저감시키고 안정성을 확보하는 것은 중요한 이슈이며, 특히 자동차 분야에서는 그 요구가 지속적으로 제기되고 있다. 차량의 진동과 불안정성을 유발하는 대표적인 외란 요인은 주행하는 차량 타이어에 접촉하는 불규칙한 도로면 형상이다. 따라서 이러한 외란 형상 정보를 확보하는 것은 매우 중요한 과정이다. 본 연구에서는 차체에 부착된 센서로부터 측정된 신호에 혼입된 차량의 동적 거동 영향을 배제하고 관심 도로면의 형상 정보를 재현할 수 있는 RPS 알고리즘과 이를 적용한 실험결과를 제시하였다. 이를 토대로, 예견제어 이론을 응용한 전자 제어 현가 시스템과 7 자유도 전차량 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 반능동형 작동기와 결합된 지능형 제어 시스템을 통하여 자동차의 주요 성능 지수인 승차감과 조종안정성의 개선 효과를 확인하였으며, 제안한 제어 프레임의 효용성을 제시하였다.

Abstract In this study, based on the RPS algorithm, the application results to an electrically controlled suspension system using previewed road information are presented. Reducing the excessive vibration induced by a disturbance transmitted to the system and secure its stability is a major issue. In particular, in the automotive industry, the demand is constantly being raised. A typical external disturbance causing vibration and instability of a vehicle is an irregular roadway surface that contacts a running vehicle tire. Therefore, obtaining such profile information is an important process. The RPS algorithm using a multi sensor system was constructed and implemented in a real car. Through experimental work using the RPS system included non-contact type optical sensors, it could robustly reconstruct the road input profiles from the intermixed data onto the vehicle's dynamic motion while traveling at an uneven roadway surface. A controller with a preview control was designed in the framework of a semi-active suspension system based on the 7 degrees of freedom full vehicle model. The control performance of the system was evaluated through simulations and the results were compared with the passive vehicle condition. These results highlight the feasibility of the presented control frame.

Keywords : Preview Control, Road Profile, Semi-active Control, Vehicle Suspension, Vibration Control

1. 서론

시스템에 전달되는 외란으로 유발되는 과도한 진동 및 그 영향을 저감시키고 안정성을 확보하고자 하는 것은 많은 분야에서 연구되는 주요 이슈이다. 대표적으로

자동차의 경우에도, 주행하는 불규칙한 도로, 운전 조작, 횡풍과 같은 외란의 영향으로부터 승차감과 조종안정성을 향상시키기 위해 다양한 제어 이론을 적용하여 능동형/반능동형 현가시스템을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되어왔다[1-4].

본 논문은 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음.(201510055)

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

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

Received February 27, 2017

Revised (1st March 28, 2017, 2nd April 4, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

이들 중에는 대상이 되는 차량 시스템에 가해지는 노면 외란에 대한 정보를 활용하여 제어 성능을 향상시키려는 연구들이 포함된다. 초음파 센서를 이용하여 가변식 작동 탬퍼의 응답 지연을 보상하는 소극적 방식의 적용뿐 아니라, 보다 적극적 방식으로는 주행 노면에 대한 구체적 정보를 직접적으로 제어 시스템에 적용하고자 하는 연구들이다. 즉, 노면 외란의 정보를 이용하는 예견제어(preview control) 이론을 통해 제어성을 향상 시키고자 하는 것이다. 그러나 이러한 연구들 대부분은 구체적인 노면 정보 획득에 대한 방안을 포함하지 않고, 확정적인 형상 데이터를 알고 있다는 가정 하에 진행되었다 [5-7].

운행되는 차량에 접촉하는 도로 면의 형상을 직접 측정하는 방법으로는 정적인 토목공학적 방식의 profilometer가 기본적인, 이외에도 차량에 부착한 간단한 look-ahead 센서나 차량 바퀴의 응답으로부터 단면 형상을 유추하는 방식들이 있다. 이러한 방법들은 측정에 많은 시간이 소요되거나, 차량의 동역학적 응답이 측정결과에 포함되어 그 정확성이 현격히 저하되게 된다. 또한 차량의 선형/비선형 파라미터에 대한 정확한 파악이 요구되는 등, 측정이 차량 특성에 종속적이 되므로 직접적인 형상정보 구현 방식으로는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여, 주행하는 관심 도로 면의 형상 정보를 얻을 수 있는 멀티 센서를 이용한 형상 재현 알고리즘과 차량 진행 방향으로의 노면 종단면 형상 재현 결과를 기반으로 수동형 현가 시스템의 성능을 향상시키기 위한 반능동형 시스템에 적용함으로써 그 유용성을 검토하였다.

2. RPS 시스템

대상 시스템에 작용하는 외란에 대하여 구체적 정보를 얻는 것은 시스템 해석에 매우 유용하다. 자동차의 해석에 있어서도 도로 표면에 대한 정보가 필수적이다. 그러나 주행 중인 차량의 차체에 부착된 센서를 이용하여 직접 도로 면의 형상을 측정하는 경우에는, 측정 신호에 차량의 동적 거동이 포함되게 된다. 그러므로 이 오염된 데이터를 노면정보로써 직접 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 대상 도로 면의 형상 정보를 얻기 위해서는 혼입된 동역학적 응답 신호의 영향을 배제하는 프로세스

가 필요하다. 즉, 획득된 원 데이터로부터 주행 노면에 대한 형상을 재현해 내기 위한 알고리즘의 적용이 요구된다.

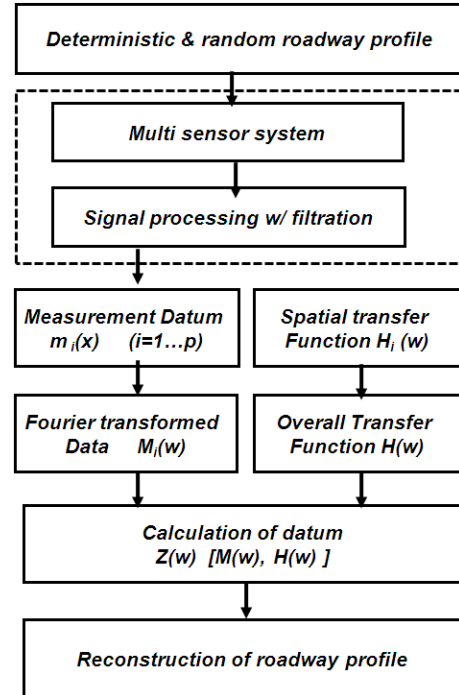


Fig. 1. Schematic Diagram of RPS Algorithm

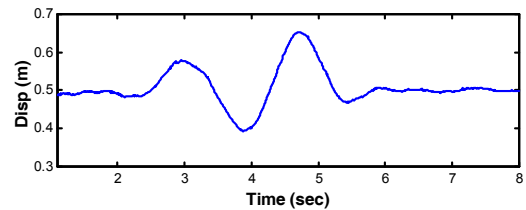


Fig. 2. Directly Measured Sensor Signal (Sensor 1)

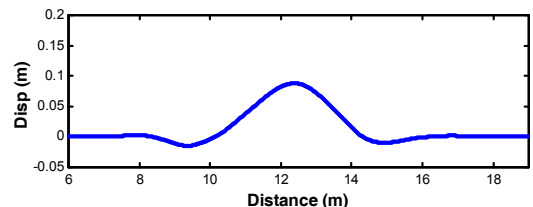


Fig. 3. Experimental Result using RPS System

Fig. 1에 이러한 요구에 부응하는 RPS(road profile sensing) 알고리즘의 구조 특성을 나타내었다. 선행 연구에 제시된 것과 같이[8], 시스템 전달함수의 주파수특성

은 적용하는 두 개의 센서 사이 거리 함수로 결정된다. 복수의 센서를 조합하면 전체 측정시스템의 전달함수 특성을 개선시킬 수 있으며, Fig. 1에 도시한 멀티센서 시스템을 이용하는 알고리즘을 적용함으로써 노면 정보를 보다 충실히 측정 할 수 있다.

전술한 알고리즘을 적용한 시스템을 실제 차량에 구현하여 실험을 수행한 결과를 Fig. 2, Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3와 같은 단면 형상을 가지는 도로 면을 주행할 때 차체에 부착된 레이저 센서로부터 측정된 데이터를 Fig. 2에 나타내었다. 결과에서처럼 측정 신호에는 주행 차량의 동적 거동 영향이 혼입되어 나타나게 되어 차체에 부착된 센서 신호만으로는 관성 도로 면의 형상 정보를 정확히 파악하는 데에 한계가 있음을 알 수 있다. 그러나 오염된 데이터로부터도 제한한 알고리즘을 적용함으로써, Fig. 3와 같이 대상 형상을 충실히 재현해낼 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 대상차량 모델

불규칙한 노면 외란에 대한 자동차의 운동을 기술하고 제어기를 설계하기 위하여 다음과 같은 차량 모델을 적용한다.

우선, 강체로 모델링한 차체에 상당하는 스프링상 질량의 상하 운동(z), 롤(θ), 피치(φ)과 집중질량으로 모델링한 스프링하 질량에서의 각각의 수직운동(x_{ui}, i=1..4)을 고려한다. 타이어는 노면과 점 접촉하는 선형 탄성요소(k)로 나타낸다. 현가 시스템의 탄성 및 감쇠요소를 포함하여, 노면 외란(x_{ni}, i=1..4)에 대한 대상 시스템의 진동 모델로 7자유도 차량 모델을 적용하였다.

차량에 대한 운동방정식은 스프링 상, 하 질량에 대하여 정리하여 식(1), 식(2)으로 나타낼 수 있으며 각각의 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$[M_s]\{\ddot{X}_c\} + [R][K_s][R]^T\{X_c\} - [R][K_s]\{X_u\} + [R][C_s][R]^T\{\dot{X}_c\} - [R][C_s]\{\dot{X}_u\} = [R]\{f_a\} \quad (1)$$

$$[M_u]\{\ddot{X}_u\} + [K_s]\{X_u\} - [K_s][R]^T\{X_c\} + [K_t]\{X_u\} - [K_t]\{X_r\} - [C_s][R]^T\{\dot{X}_c\} + [C_s]\{\dot{X}_u\} = -\{f_a\} \quad (2)$$

여기서,

$$\{X_c\} = [z \ \phi \ \theta]^T, \quad \{X_s\} = [x_{s1} \ x_{s2} \ x_{s3} \ x_{s4}]^T$$

$$\{X_u\} = [x_{u1} \ x_{u2} \ x_{u3} \ x_{u4}]^T$$

$$\{X_r\} = [x_{r1} \ x_{r2} \ x_{r3} \ x_{r4}]^T$$

$$\{f_a\} = [f_{a1} \ f_{a2} \ f_{a3} \ f_{a4}]^T$$

$$[M_s] = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}, \quad [M_u] = \begin{bmatrix} m_{u1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{u3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u4} \end{bmatrix},$$

$$[C_s] = \begin{bmatrix} c_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{s4} \end{bmatrix}, \quad [K_s] = \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{s4} \end{bmatrix},$$

$$[K_t] = \begin{bmatrix} k_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_t \end{bmatrix}, \quad [R] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{t_f}{2} & \frac{t_f}{2} & -\frac{t_r}{2} & \frac{t_r}{2} \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix}$$

여기서 {X_c}는 차체 무게중심에서의 좌표를 나타내고 {X_s}는 차체의 현가계 지지점에서 수직 변위를 나타내며, 전/후륜 휠베이스 l_f, l_r, 좌/우 차폭 t_f, t_r에 대하여 행렬 R의 관계를 갖는다. 차체의 질량, 롤관성 모우먼트, 피치 관성 모우먼트를 각각 m_s, I_x, I_y로, 현가계의 강성과 감쇠를 k_{si}, C_{si} (i=1..4)로 각각 나타낸다.

식(1),(2)의 운동방정식으로부터 상태벡터 {X_v}를 선정하고, 각각의 타이어에서 노면의 외란 {X_i}과 현가계 요소와 병렬로 장착된 작동기에 의한 제어력 {f_a}를 제어 입력으로 하는 상태방정식은 식(3)로 나타낼 수 있다. 또한 각각의 특성 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\{\dot{X}_v\} = [A]\{X\} + [B]\{f_a\} + [L]\{X_r\} \quad (3)$$

여기서,

$$\{X_v\} = [\{X_c\}^T \ \{\dot{X}_c\}^T \ \{X_u\}^T \ \{\dot{X}_u\}^T]^T$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ (-M_s^{-1}RK_sR^T) & (-M_s^{-1}RC_sR^T) & (M_s^{-1}RK_s) & (M_s^{-1}RC_s) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ (M_u^{-1}K_sR^T) & (M_u^{-1}C_sR^T) & (-M_u^{-1}K_s) & (-M_u^{-1}C_s) \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M_u^{-1}R \\ \mathbf{0} \\ M_u^{-1} \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ M_u^{-1}K_T \end{bmatrix}$$

4. 제어기 설계

자동차에서 승차감과 주행안정성은 서로 상충되는 성능 요소이며, 수동적인 현가계에서는 이를 동시에 양립시키기 어려워 절충 설계가 요구된다. 따라서 산,학계에서는 능동형/ 반능동형 구조와 제어알고리즘을 결합한 지능형 현가시스템을 이용한 성능 향상에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다[9-12]. 이러한 제어 기법들 중에서 효율적인 방안으로, 차량이 진행할 노면에 대한 정보를 미리 확보할 수 있다면 이를 활용하여 보다 나은 제어 성능을 얻을 수 있는 것으로 제시된다[13]. 그러나 예견 제어이론의 적용에 있어, 사용할 노면 정보가 왜곡되어 있다면 오히려 그 성능에 악영향을 미칠 수 있는 것이다.

본 절에서는 전술한 노면 형상 감지 알고리즘을 이용한 RPS 시스템의 도로면 형상 정보를 이용하는 제어기를 설계하였다.

전장의 차량 모델을 기준으로 출력식과 출력 벡터 $\{y_v\}$ 를 다음의 식(4)와 같이 나타낸다.

$$\{y_v\} = [C_v] \{X_v\} + [D_v] \{f_a\} + [E_v] \{X_r\} \tag{4}$$

여기서,

$$\{y_v\} = \{ \dot{X}_c (x_{si} - x_{ui}) (x_{ui} - x_{ri}) \}^T \quad (i=1..4)$$

성능지수를 다음의 식과 같이 정의한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{T_p} [\{y_v\}^T [Q_v] \{y_v\} + \{f_a\}^T [R_v] \{f_a\}] dt \tag{5}$$

여기서 $[Q_v]$ 는 대칭, 양의 반한정(positive semi-definite) 행렬이며, $[R_v]$ 는 대칭, 양의 한정(positive definite)행렬이다. T_p 는 예견 시간을 나타낸다.

최적 제어 이론에 의해서 제어 입력에 대한 식은 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$f_a = u_{FB} + u_{FF} = -K_{FB} \{X_v\} - K_{FF} r \tag{6}$$

여기서,

u_{FB} : Feedback control input

u_{FF} : Feedforward control input

K_{FB} : Feedback gain

K_{FF} : Feedforward gain

식(6)의 제어입력에서 피드백 제어 부분 u_{FB} 과 노면 정보를 이용하는 피드포워드 부분 u_{FF} 은 다음의 식으로 각각 나타내어진다.

$$u_{FB} = -R_v^{-1} (B_v^T P + D_v^T Q C_v) X_v \tag{7}$$

$$u_{FF} = -R_v^{-1} B_v^T r \tag{8}$$

여기서 P 는 다음의 대수 리카티 방정식 (algebraic riccati equation)을 만족하는 해로 대칭(symmetric), 양의 한정(positive definite)이다.

$$A_v^T P - P B_v P + C_v + P A_v = 0 \tag{9}$$

$r(t)$ 는 다음의 식(10)과 같다.

$$r(t) = \int_0^{T_p} e^{A_c^T \sigma} W_c w(\sigma) d\sigma \tag{10}$$

여기서, $W_c = -C_v^T Q_v E_v + P L_v, A_c = A_v - B_v R_v^{-1} B_v^T P$

5. 시뮬레이션

본 절에서는 설계된 제어시스템의 특성을 파악하기 위하여 7자유도 전차량 진동 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 제어 전/후의 성능을 비교하였다. 노면 외란 입력은 RPS 시스템을 활용한 Fig. 3의 실험 결과로부터 좌/우측 타이어에 동일하게 피치 노면 입력으로 적용하였다.

일반적으로 능동형 작동기를 이용하는 현가 시스템은

우수한 제어성능을 얻을 수 있는 장점에도 불구하고, 소모 동력 과다, 복잡한 시스템 구성 등의 이유로, 특수한 경우를 제외하고는 상용화되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 절에서는 현실적 대안으로, 가변형 댐퍼 작동기와 제안된 제어 시스템으로 구성되는 반능동형 현가시스템을 적용하였다. 이러한 전자제어 현가시스템의 구현 효율성을 파악하기 위하여 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다.

가변형 댐퍼의 경우에는, 그 작동 특성으로 인하여 설계된 제어기 입력 f_d 와 실제 제어입력 f_a 에는 다음과 같은 구속관계식이 적용된다.

$$f_{ai} = \begin{cases} f_{di} & [f_{di}(\dot{x}_{si} - \dot{x}_{ui}) \geq 0] \\ 0 & [f_{di}(\dot{x}_{si} - \dot{x}_{ui}) < 0] \end{cases} \quad (i=1...4)$$

이때 작동기는 그 감쇠가변 폭에도 제한을 받게 되므로 실제 시스템에 작용하게 되는 감쇠력은 식(11)와 같이 선정되는 감쇠계수 C_a 에 의해서 결정된다.

$$C_{a_k} = \begin{cases} C_{\max_k} (C_{d_k} > C_{\max_k}) \\ C_{d_k} (C_{\min_k} \leq C_{d_k} \leq C_{\max_k}) \\ C_{\min_k} (C_{d_k} < C_{\min_k}) \end{cases} \quad (i=1...4) \quad (11)$$

여기서, $C_{d_k} = \frac{f_{d_k}}{(\dot{x}_{s_k} - \dot{x}_{u_k})}$

구현된 시스템의 제어 성능을 평가하기 위하여 수행한 시뮬레이션 결과를 Fig.4에 각각 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타낸 차체의 수직 방향 가속도와 Fig. 4(b)에 도시한 차체의 전후 방향 피치 가속도를 살펴보면, 비제어시에 비하여 그 크기를 현저히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 차량에 탑승한 운전자가 체감하는 승차감의 향상으로 파악할 수 있다. Fig. 4(d)에는 타이어 변위를 비제어시와 비교하여 나타내었다. 결과에서처럼 제어를 통하여 그 동적 변위를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있는데, 이것은 타이어의 접지성과 밀접하게 연결되어 조종성능의 향상 결과를 나타내고 있다. 또한 Fig. 4(c)에서처럼 작동기의 행정거리는 제한된 안정 범위에서 작동함을 알 수 있는데, 일부 능동형 현가 시스템에서 제기되는 과도한 작동기 변위 문제는 발생하지 않음을

확인할 수 있다. 또한 간략화 된 정량적 평가를 위해 Fig. 5에 정규화 된 RMS 값들을 비교하여 도시하였다. 제어를 하지 않은 경우를 기준으로, 수직 가속도, 피치 가속도, 현가 변위 그리고 타이어 변위는 각각 0.67, 0.72, 0.79, 0.77 수준으로 개선됨을 확인할 수 있다. 따라서 가변형 댐퍼와 실제 노면 정보를 이용하는 예견 제어를 구현한 반능동형 현가시스템을 적용함으로써 일반적인 수동형 시스템에 비하여 효율적으로 승차감과 조종성능의 개선을 구현할 수 있음을 확인할 수 있다. 제안된 제어 시스템 프레임은 지능형 차량 개발에 적용되어 제 성능의 향상 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 해석과 결과들을 토대로 향후 실험적 응용 연구를 수행할 예정이다.

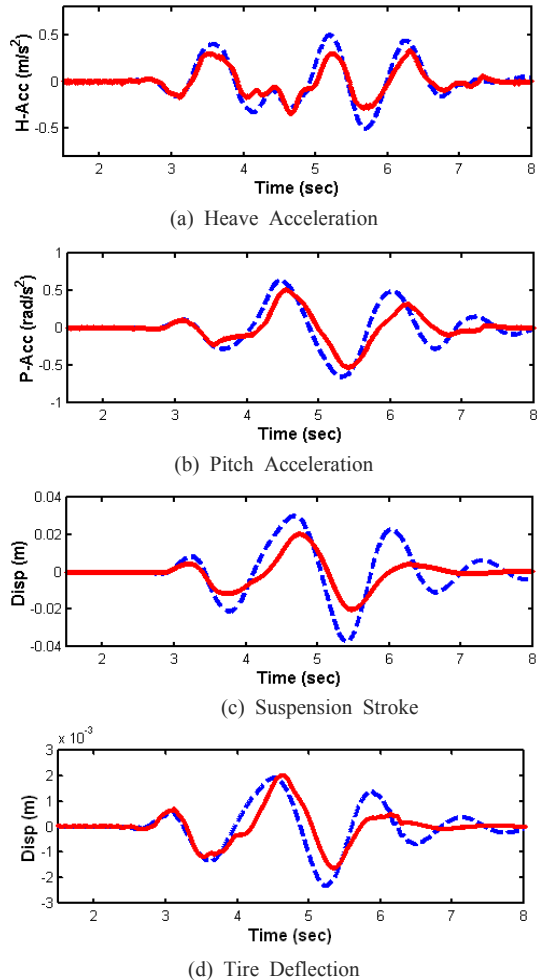


Fig. 4. Comparison of Control Performance (dashed : Uncontrolled, bold-line : Controlled)

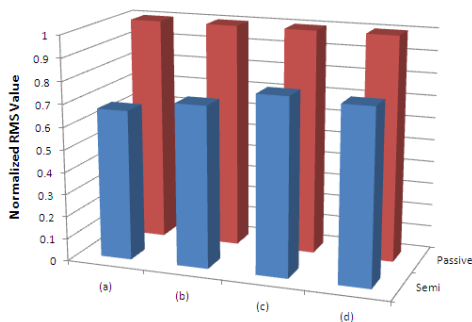


Fig. 5. Comparison of Normalized RMS Values (a) Heave Acceleration (b) Pitch Acceleration (c) Suspension Stroke (d) Tire Deflection

6. 결론

자동차의 진동과 불안정성을 유발하는 불규칙한 주행 노면의 외란 형상 정보를 활용하여 발생 진동을 제어하는 지능형 현가 시스템에 대한 본 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주행 차량에서, 동역학적 거동 영향을 배제하고 관심 도로 면의 형상을 재현할 수 있는 RPS 알고리즘과 실제 차량에 구현된 시스템을 적용한 실험 결과를 통해 그 효용성을 제시하였다.
- (2) 이를 기반으로, 예견제어 기법과 반능동형 작동기로 구성된 전자제어 현가시스템의 구성을 제안하였다.
- (3) 전 차량 모델에 제안한 시스템의 시뮬레이션을 수행하여, 대상 노면 입력에서 수직/피치가속도, 동적타이어변위를 0.67/0.72, 0.77 수준으로 감소시켜, 승차감과 조종안정성을 포함한 제 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] H. J. Kim, "Experimental study of active vibration control for trailed two-wheeled device", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 2, pp. 363-369, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0046-y>

[2] 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: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2046581>

[3] H. J. Kim, "Robust roll motion control of a vehicle using integrated control strategy", *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 820-827, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.04.009>

[4] 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: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037313>

[5] T. J. Gordon, R. S. Sharp, "Improving the performance of automotive semi-active suspension systems through road preview", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 217, no. 1, pp.163-182, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1766>

[6] 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: <https://doi.org/10.1115/1.2930239>

[7] G. Prokop, R.S. Sharp, "Performance enhancement of limited-bandwidth active automotive suspensions by road preview", *Control Theory & Applications*, vol. 142, no. 2, pp.140-148, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-cta:19951772>

[8] H. J. Kim, "Road Measuring System using Surface Profile Sensing Algorithm", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 12, no. 3, pp. 1098-1104, 2011.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1098>

[9] 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: <https://doi.org/10.1177/1077546314528230>

[10] S. Weichao, G. Huijun, Y. Bin, "Adaptive robust vibration control of full-car active suspensions with electrohydraulic actuators", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 2417-2422, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2237174>

[11] 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: <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2190372>

[12] 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: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1135970>

[13] G. Christoph, S. Andreas, W. Andreas, S. Oliver, "Design and vehicle implementation of preview active suspension", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 1135-1142, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2272342>

김 효 준(Hyo-Jun Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1988년 1월 ~ 1993년 7월 : 대우 중공업 중앙연구소
- 2001년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

동적시스템의 강건제어, 고충격 시스템 해석/안정화 시스템