

# RPS 시스템을 이용한 차량 제어 특성 해석

김효준<sup>1\*</sup>, 이창노<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 기계공학과, <sup>2</sup>우석대학교 기계자동차공학과

## Analysis of Control Performance using RPS System

Hyo-Jun Kim<sup>1\*</sup>, Chang-Ro Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Woosuk University

**요약** 본 연구에서는 주행하는 도로면의 단면 형상 정보를 이용하는 RPS 시스템과 다원형 감쇠 특성을 가지는 MSD 시스템을 기반으로 예견 제어 알고리즘을 적용한 지능형 현가 시스템을 제안하고, 그 결과를 제시하였다. 자동차의 과도한 진동과 조종 불안정성을 유발하는 대표적인 외란 입력은 주행하는 도로면에 돌출되거나 함몰된 불규칙한 주행 장애물이다. 이러한 장애물의 존재 유무만이 아니라 그 형상에 대한 정보를 안다면 이를 활용하여 제어 성능을 개선시킬 수 있다. 선행 연구 결과를 바탕으로 하여, 상용성을 고려한 구조화된 작동 시스템을 적용한 응용 연구를 수행하였다. 이를 위해 RPS 시스템과 예견 제어 기법을 기반으로 한 제어 알고리즘과 다차원화된 감쇠 특성을 가지는 MSD 시스템 간의 스위칭 알고리즘을 개발, 연계성을 제시하였다. 실차 적용성을 파악하기 위하여, 제안된 제어 프레임워크를 전차량 모델에 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. 구조적 간결성을 목표로 적용된 3-DS 작동기 시스템과 결합된 전자제어식 현가 시스템을 통하여 탑승자의 승차감과 차체의 조종 안정성을 효과적으로 개선할 수 있음과 제 시스템의 유용성을 확인하였다.

**Abstract** This paper proposes an advanced suspension system and reports its performance in the framework of the preview control algorithm based on the RPS (road profile sensing) system and MSD system with the multi-stage damping characteristics. Typical disturbance inputs that cause excessive vibration and steering instability of an automobile are irregular obstacles that protrude or sink into the road surface to be driven. The control performance can be improved if information on the existence and shape function of its obstacle is known. Based on the results of the previous study, advanced research that uses the actuating system has been processed to be commercialized practically. For this purpose, a switching algorithm between the control logic and the multi-stage damping system was developed and its connectivity is presented. To verify the applicability of an actual vehicle, the proposed control system was implemented in full vehicle models and simulations were performed. The proposed system using the 3-DS actuator system, which is applied for structural simplicity, can improve the ride comfort and steering stability. In addition, the results indicate the feasibility of the intelligently controlled suspension system.

**Keywords :** MSD System, Preview Control, Semi-active Control, Vehicle Suspension, Vibration Control

### 1. 서론

자동차에 입력되는 내/외부의 교란 요인으로 인하여 유발되는 차량의 부적절 운동, 과도한 진동 및 그 악영향

을 저감시키고 안전성을 확보하고자 하는 것은 꾸준히 연구되는 주요 이슈이다.

브레이크 작동, 스티어 핸들 조작, 급속한 풍속 변화, 주행 도로면의 돌출/함몰된 장애물 등과 같이 차량에 작

본 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(620160062)로 연구하였음.

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

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

Received February 28, 2018

Revised April 12, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

용하는 외란 입력으로부터 차체의 조종안정성과 탑승자의 승차감을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되어왔다.

이들 중, 대상 도로면의 불규칙함으로 인한 차량 진동 문제를 적극적으로 해소하기 위하여 주행 노면에 대한 구체적 정보를 직접적으로 제어 시스템에 적용하고자 하는 연구들이 있다.

Ali[1]는 look-ahead 정보를 이용하여 예견제어 (preview control) 이론을 통해 두 개의 accumulator로 구성된 반능동형 작동시스템을 갖는 1/4차량 모델에 적용한 연구결과를 발표하였다. Gohrle[2]는 작동주파수 범위가 5Hz 내외의 저속 능동형 현가시스템에 적용하는 연구를 하였다. Xie[3]는 중량자동차(heavy-duty vehicle)를 대상으로 공압 현가 시스템과 복잡한 제어로직(FPW : fuzzy-wheelbase preview with wavelet denoising filter)을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 최근 Li[4]는 파라미터가 불확실한 시스템 문제에 대한 해법으로 LMI(linear matrix inequality) 기법을 적용하여 이론적 접근을 시도하였다. 또한 관련 연구들을 살펴보면, 구체적인 노면 정보 획득에 대한 방안을 포함하지 않고, 확정적인 형상 데이터를 알고 있다는 가정 하에 진행되거나, 복잡한 제어 기법의 수학적 전개에 편중된 연구들이 많은 상황이다.

본 연구에서는, 주행하는 관심 도로 면의 형상 정보를 파악할 수 있는 RPS 시스템과 MSD(multi-stage damping) 시스템을 기반으로 하는 전자제어 현가 시스템에 대한 응용 연구를 수행하였으며, 전차량 모델에 상용성을 고려하여 구조화된 3-DS(damping stage) 시스템을 바탕으로 제안한 반능동형 현가 시스템을 적용함으로써 그 유용성을 검토하였다.

## 2. 전차량 모델

균일하지 않은 주행 도로면의 영향으로 인한 자동차의 운동을 기술하기 위해서 1/4, 1/2차량 등 다양한 자동차 모델이 적용된다. 본 연구에서는 불규칙한 노면 외란에 대한 자동차의 제 운동을 기술하고, 제어를 설계하기 위하여 7자유도 전차량 모델을 적용하였다.

각각의 타이어에 작용하는 노면의 외란  $\mathbf{X}_r$ 과 현가계 요소와 병렬로 장착된 작동기에 의한 제어력  $\mathbf{f}_a$ 를 제어 입력으로 하며, 상태벡터  $\mathbf{X}$ 에 대한 상태방정식은 식(1)

로 나타낼 수 있다. 또한 각각의 특성 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{f}_a + \mathbf{L}\mathbf{X}_r \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_c^T \ \dot{\mathbf{X}}_c^T \ \mathbf{X}_u^T \ \dot{\mathbf{X}}_u^T]^T$$

$$\mathbf{X}_r = [x_{r1} \ x_{r2} \ x_{r3} \ x_{r4}]^T$$

$$\mathbf{f}_a = [f_{a1} \ f_{a2} \ f_{a3} \ f_{a4}]^T$$

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

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

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}, \mathbf{M}_u = \begin{bmatrix} m_{u1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{u3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u4} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} c_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{s4} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{s4} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} k_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_t \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{t_f}{2} & \frac{t_f}{2} & -\frac{t_r}{2} & \frac{t_r}{2} \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix}$$

여기서  $\mathbf{X}_c$ 는 차체 무게중심에서의 좌표를 나타내고  $\mathbf{X}_u$ 는 차체의 현가계 지지점에서 수직 변위를 나타내며, 전/후륜 휠베이스  $l_f, l_r$ , 좌/우 차폭  $t_f, t_r$ 에 대하여 행렬  $\mathbf{R}$ 의 관계를 갖는다. 차체의 질량, 톨관성 모우먼트, 피치 관성 모우먼트를 각각  $m_s, I_x, I_y$ 로, 현가계의 강성과 감쇠를  $k_{si}, C_{si}$  ( $i=1..4$ )로 각각 나타내었다.

## 3. 제어시스템

### 3.1 시스템 구성

자동차에 작용하는 대표적인 외란 요인으로는 브레이크

킹 조작, 스티어 휠들 조작, 횡방향 강풍 및 주행하는 도로면의 불규칙성에 기인한 타이어 작용 등 단순 입력 형태 뿐 아니라, 때에 따라서는 다수의 입력이 동시에 복합적으로 작용하기도 한다. 이러한 외부의 교란 요인들로부터 자동차의 운동을 운전자의 의도대로 조종하기 위해서는 수동적 부품 요소들의 조합만으로는 실현하기 어렵다. 따라서 산업계 및 학계에서는 다양한 작동 기 시스템 구조와 제어알고리즘을 결합한 지능형 시스템을 적용하는 성능 향상에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다[5-6]. 이중 불균일 도로면과 관련된 주행 차량의 성능 문제는 계속해서 이슈가 되고 있는 대표적인 연구 분야이다 [7-11]. 즉, 노면 외란 입력에 의한 승차감과 주행안정성 문제에서, 수동적인 현가계에서는 이를 동시에 양립시키기 어려워 절충 설계가 필요하므로, 다양한 제어 이론을 토대로 연구가 진행되고 있는 상황이다. 이러한 제어 기법들 중에서 효율적인 방안으로, 차량이 진행할 노면에 대한 정보를 미리 확보할 수 있다면 이를 활용하여 보다 나은 제어 성능을 얻을 수 있다[12-13].

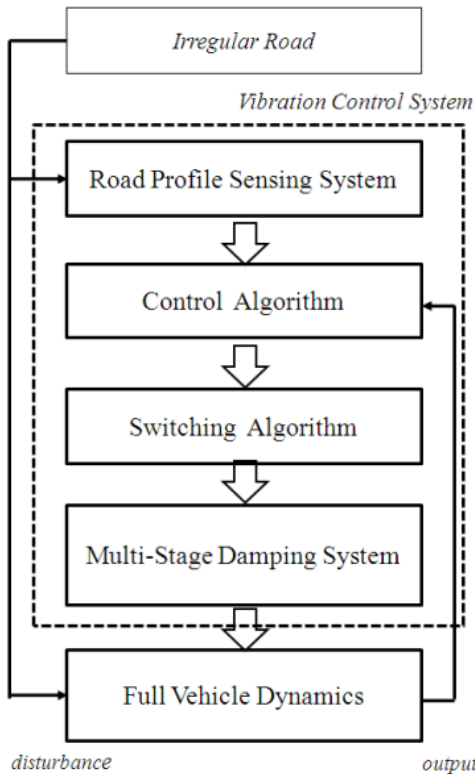


Fig. 1. Schematic Diagram of Control System Structure

선행 연구 결과를 토대로 Fig. 1과 같은 제어시스템을 구성하였으며, 식(1)의 시스템에 작용하는 제어 입력에 대한 식은 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$f_a = u_{FB} + u_{FF} = -K_{FB}X_v - K_{FF}r \quad (2)$$

여기서,

- $u_{FB}$ : Feedback control input
- $u_{FF}$ : Feedforward control input
- $K_{FB}$ : Feedback gain
- $K_{FF}$ : Feedforward gain

식(2)의 제어입력에서 피드백 제어 부분  $u_{FB}$  과 노면 정보를 이용하는 피드포워드 부분  $u_{FF}$  은 다음의 식으로 각각 나타내어진다.

$$u_{FB} = -R_v^{-1}(B_v^T P + D_v^T Q C_v) X_v \quad (3)$$

$$u_{FF} = -R_v^{-1} B_v^T r \quad (4)$$

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

$$A_v^T P - P B_v P + C_v + P A_v = 0 \quad (5)$$

$r(t)$  는 다음의 식(6)과 같다.

$$r(t) = \int_0^{T_p} e^{A_v^T \sigma} W_c w(\sigma) d\sigma \quad (6)$$

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

예견제어 이론의 적용에 있어, 사용할 노면 정보가 왜곡되어 있다면 오히려 그 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 본 절에서는 선행 연구 결과를 토대로 RPS 시스템의 도로면 형상 정보를 이용하는 제어시스템을 확장, 적용하였으며, 실제 차량에서 RPS 시스템을 통해 실험적으로 제현된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

### 3.2 MSD 시스템

일부 군수용 시스템이나 특수 분야를 제외하고는 시스템 구성의 복잡성, 구축 비용 및 유지 관리 문제 등의 현실적 이유로, 성능이 우수한 능동형 현가 시스템보다는 반응동형 현가시스템의 상용화가 선호되어지고 있다. 따라서 반응동형 시스템의 구조적 한계로 인한 성능 향상 문제가 계속해서 제기되고 있는 상황이다. 본 절에서

는 현실적 대안으로, N개의 감쇠 특성을 가지며 이를 절환(switching)하여 적용하는 MSD(multi-stage damping) 시스템을 기초로 가변형 댐퍼 작동기와 제시된 제어 시스템으로 구성되는 반능동형 현가시스템을 구조화하여 적용하였다.

MSD 시스템은 신장(extension)과 압축(compression) 행정(stroke)의 특성이 다르게 설계된다. 본 연구에 적용하는 MSD 시스템의 ED (extension damping) 값은 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$ED_{d_k} = \begin{cases} EU_k (ED_{d_k} > EU_k) \\ ED_{d_k} (EL_k \leq ED_{d_k} \leq EU_k) (k=1\dots4) \\ EL_k (ED_{d_k} < EL_k) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } ED_{d_k} = \frac{f_{d_k}}{(x_{s_k} - x_{u_k})}$$

$f_{d_k}$ 에는 다음과 같은 구속관계식이 적용된다.

$$f_{d_k} = \begin{cases} f_{a_k} & [f_{a_k} (\dot{x}_{si} - \dot{x}_{ui}) \geq 0] \\ 0 & [f_{a_k} (\dot{x}_{si} - \dot{x}_{ui}) < 0] \end{cases} \quad (8)$$

이때, N단으로 구성된 MSD 시스템의 경우에는 다음과 같은 댐핑값을 갖도록 설계된다.

$$ED = [E_1, \dots, E_i, \dots, E_N] \quad (i=1\dots N) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } E_1 = EL$$

$$E_N = EU$$

(EL : lower extension damping value, EU : upper extension damping value)

같은 방식으로, 서스펜션에 위치하는 MSD 시스템의 CD(compression damping) 값도 다음과 같이 결정되게 된다.

$$CD_{d_k} = \begin{cases} CU_k (CD_{d_k} > CU_k) \\ CD_{d_k} (CL_k \leq CD_{d_k} \leq CU_k) (k=1\dots4) \\ CL_k (CD_{d_k} < CL_k) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } CD_{d_k} = \frac{f_{d_k}}{(x_{s_k} - x_{u_k})}$$

이때, N단으로 구성된 MSD 시스템에 대하여 다음과 같은 댐핑값을 갖도록 설계된다.

$$CD = [C_1, \dots, C_i, \dots, C_N] \quad (i=1\dots N) \quad (11)$$

$$\text{여기서, } C_1 = CL$$

$$C_N = CU$$

(CL : lower compression damping value, CU : upper compression damping value)

식(7), (10)에 의해서 결정되는 댐핑값을 바탕으로 절환알고리즘 (switching algorithm)을 적용하여 식(9), (11)에 대응하는 적정 스테이지로 매핑(mapping)되도록 구조화된 MSD 시스템을 탑재한 전자제어 현가시스템을 구축하였다.

#### 4. 전차량 적용 해석

본 절에서는 제안된 RPS 시스템과 MSD 시스템을 기반으로 하는 제어시스템의 특성을 파악하기 위하여 전차량 진동 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 제어 전/후의 성능을 비교하였다. 노면 외란 입력은 RPS 시스템을 활용한 Fig. 2의 실험 결과로부터 좌/우측 타이어에 동일하게 피치 노면 입력으로 적용하였다.

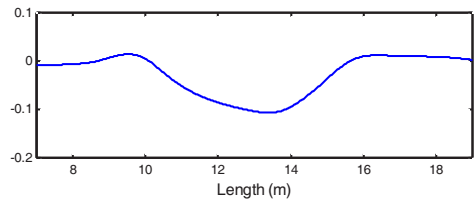


Fig. 2. Experimental Result using RPS System

시뮬레이션에 적용한 MSD 시스템의 구조 특성을 Fig. 4에 도시하였다. 이는 일부 상용 차량에 적용되는 모드 선택형 댐핑 시스템의 확장 시스템으로, 식(9),(11)과 같은 특성을 갖는 MSD 시스템 중에서 가장 간결한 시스템이다.

본 연구에서는 이와 같이 단순화한 하드웨어적 구조와 결합된 전자제어 현가 시스템의 제 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 3에 도시한 3-DS(damping stage) 시스템의 ED (extension damping)값과 CD(compression damping)값은 각각 다음의 식(12),(13)과 같이 적용되었다.

$$ED_{set} = \begin{cases} ED_1 = ED_{comfort} \\ ED_2 = ED_{normal} \\ ED_3 = ED_{sport} \end{cases} \quad (12)$$

$$CD_{set} = \begin{cases} CD_1 = CD_{comfort} \\ CD_2 = CD_{normal} \\ CD_3 = CD_{sport} \end{cases} \quad (13)$$

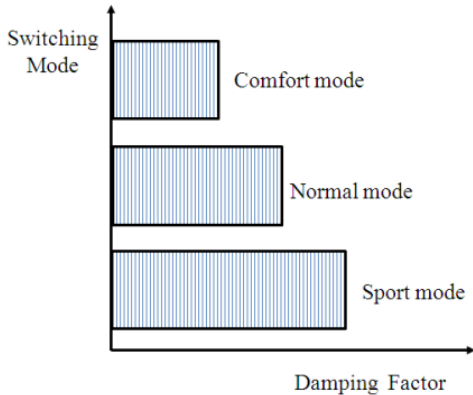


Fig. 3. 3-Damping Stage System Structure

구현된 시스템의 제어 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 4 - Fig. 8에 각각 나타내었다. 차체의 수직 방향 가속도를 Fig. 4에 도시하였으며, Fig. 5에 차체의 전후 방향 피치 가속도를 나타내었다. 결과에서처럼, 제어를 하지 않는 수동형 현가 시스템의 차량에 비하여 그 크기를 효율적으로 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 통상적으로 이는 차량 탑승자가 느끼는 승차감의 척도로 파악되는바, 비제어시 대비 개선 효과를 확인할 수 있다. Fig. 6에는 현가시스템의 행정변위를 나타내었다. 결과에서처럼, 과도한 작동범위 문제는 발생하지 않고 안정된 제한 범위내에서 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 타이어의 접지성과 밀접하게 연결된 타이어 동적 변위를 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서처럼, 비제어시와 비교하여 볼 때 그 변위를 효과적으로 감소시킬 수 있으므로 조종성능의 향상 결과로 파악할 수 있다. Fig. 8에는 적용한 3-DS 시스템의 작동 특성을 나타내었다. 결과에서 음의 부분은 압축을 의미하며, Step no. 는 식(12),(13)의 관계식에 대응한다. Fig. 4 - Fig. 7의 성능 결과와 3-DS 시스템의 설계 프로세스 간의 연계성으로부터, 시뮬레이션을 통해 sport, normal, comfort 모드로 대변된 제 파라미터들을 상세 튜닝하는데 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

시뮬레이션 결과를 토대로, 3-DS 시스템과 실제 노면 정보를 이용하는 예견 제어를 구현한 전자제어식 현가시스템을 적용함으로써 정규화된 rms값이 수동차량 대비, 수직가속도: 0.68, 피치가속도:0.72, 타이어변위:0.85 수준으로 감소되어 승차감과 조종성능의 개선을 구현할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 구조화된 시스템 프레임워크로, 3-DS 시스템 모듈 개발과 이를 확장한 MSD 시스템 개발 및 지능형 차량 개발에 적용되어 제 성능의 향상 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

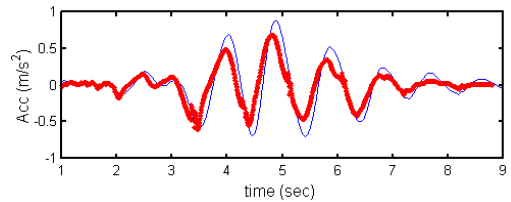


Fig. 4. Comparison of Heave Acceleration

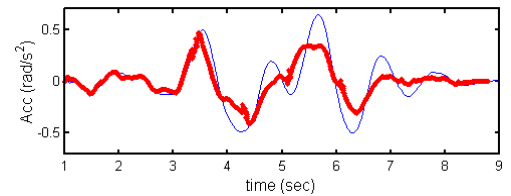


Fig. 5. Comparison of Pitch Acceleration

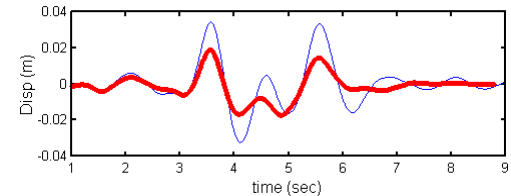


Fig. 6. Comparison of Suspension Stroke

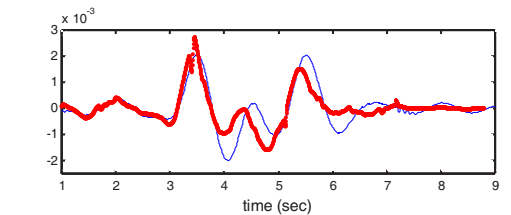


Fig. 7. Comparison of Tire Deflection  
(solid : Uncontrolled, bold-line : Controlled)

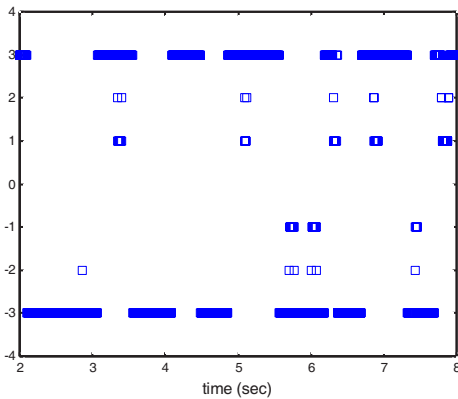


Fig. 8. Trajectories of Switching Stage in 3-DS System

## 5. 결론

불규칙한 도로면을 주행하는 자동차의 과도한 진동을 감소시키고 안정성을 향상시키기 위한 전자제어 현가시스템에 대한 본 연구의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) RPS 시스템과 MSD 시스템을 기반으로 하는 예견 제어 알고리즘을 적용한 반능동형 전자제어식 현가시스템 구성을 제시하였다.
- (2) 구조적/범용적 구현 용이성을 고려하여 구조화된 MSD 시스템을 3-DS 시스템으로 간결화 하였으며, 전자량 모델에 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다.
- (3) 시뮬레이션 결과, 승차감과 관련된 수직/피치 가속도와 조종안정성과 관련된 타이어 변위를 효율적으로 감소시킴으로써, 제 성능의 개선 효과를 확인하였으며, 구현된 제어 프레임워크를 토대로 MSD 부품 및 시스템 모듈 개발에의 적용 유용성을 확인하였다.

## References

- [1] M. Ali, "Twin accumulator semi active suspension system with preview control", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 26, no. 4, pp. 283-293, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1260/026309207783571334>
- [2] 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: <https://doi.org/10.1155/2013/974808>
- [3] 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: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2375336>
- [4] 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: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0361>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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>
- [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] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [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 호 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 시스템의 안정화 해석, 정밀기계시스템의 진동제어

---

**이 창 노(Chang-Ro Lee)**

[정회원]



- 1993년 8월 : 연세대학교 공학대학원 기계공학전공 (공학석사)
- 2000년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1983년 3월 ~ 1988년 9월 : 현대 자동차 기술연구소
- 1989년 10월 ~ 2000년 12월 : 쌍용자동차 기술연구소

• 2001년 3월 ~ 현재 : 우석대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

차량동역학, 차량제어, 기구동역학시뮬레이션