

## 모델 예측 제어를 활용한 반능동 현가장치의 Preview 제어

정 준 영<sup>1)</sup> · 이 치 범<sup>\*1)</sup>

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과<sup>1)</sup>

### Preview Control of Semi-active Suspension using Model Predictive Control

Junyoung Jung<sup>1)</sup> · Chibum Lee<sup>\*1)</sup>

*Seoul National University of Science and Technology, Department of Mechanical Design and Robot Engineering<sup>1)</sup>*

**Key words** : Preview Control(Preview 제어), Model Predictive Control(모델 예측 제어), Semi-active Suspension(반능동 현가장치), Mixed-integer Programming(혼합 정수 계획법), Half-car model(Half-car 모델)

이 치 범, E-mail: chibum@seoultech.ac.kr

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원 연구비 지원에 의한 연구임. (P0022333, 디지털트윈 3단계 기술 활용 전기·수소차 메카트로닉스 모듈 신뢰성 예측·검증 테마 구축)

본 연구는 Model Predictive Control(MPC)와 전방의 노면 정보를 활용하여 차량의 주행성능을 향상시키는 preview 제어에 관한 논문이다. 전방 노면을 인식할 수 있는 센서가 탑재되어 있는 차량을 가정하며, single bump에 한해서 주행성능이 가장 높은 제어 알고리즘을 연구한다.

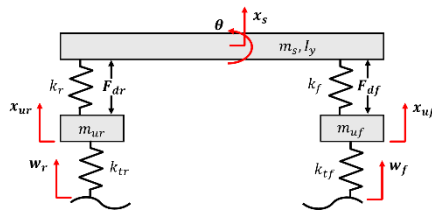


Fig. 1 Schematic of half-car model

$$[m]\ddot{X} + [k]X = F_d u + F_w w$$

$$X = \begin{bmatrix} x_s \\ \theta \\ x_{ur} \\ x_{uf} \end{bmatrix}, [m] = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ur} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{uf} \end{bmatrix}, [k] = \begin{bmatrix} k_f + k_r & -l_f k_f + l_r k_r & -k_f & -k_r \\ -l_f k_f + l_r k_r & l_f^2 k_f + l_r^2 k_r & l_f k_f & -l_r k_r \\ -k_f & l_f k_f & k_f + k_{tf} & 0 \\ -k_r & -l_r k_r & 0 & k_r + k_{tr} \end{bmatrix}$$

$$F_d = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -l_f & l_r \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} F_{df} \\ F_{dr} \end{bmatrix}, F_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ k_{tf} & 0 \\ 0 & k_{tr} \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} w_f \\ w_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

차량의 주행성능을 평가하기 위한 지표로는 sprung mass의 거동을 산정하였으며, 이를 모델링하기 위해 4 자유도의 Half-car model을 활용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 활용한 Half-car model로 댐퍼의 감쇠력을 제어 입력력으로 구성하였으며, 식 (1)과 같이 차량의 움직임을 설명하는 방정식을 활용하여 state-space model[1]을 구성하였다.

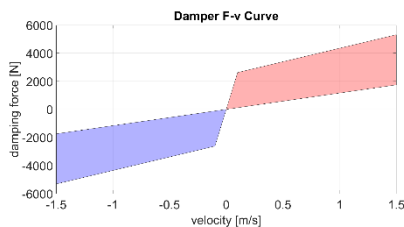


Fig. 2 Semi-active suspension F-v curve

$v_{dc} = (\text{damper velocity})$

$$\begin{cases} u \geq \beta_1 v_{dc} \\ u \leq \beta_2 v_{dc} \\ u \leq \beta_3 v_{dc} + \alpha \end{cases} \quad (\text{if}, v_{dc} \geq 0);$$

$$\begin{cases} u \leq \beta_1 v_{dc} \\ u \geq \beta_2 v_{dc} \\ u \geq \beta_3 v_{dc} - \alpha \end{cases} \quad (\text{if}, v_{dc} \leq 0) \quad (2)$$

Fig. 2는 본 연구에서 활용한 반능동 현가장치의 F-v 그래프이며, 식 (2)와 같이 댐퍼의 속도와 감쇠력이 같은 부호를 갖는 비선형 특성을 나타낸다.

차량의 preview 제어를 위해 전방 노면 정보를 통해 이를 외란으로 여기는 state-space model을 구성하여 MPC 제어 알고리즘을 구축하였으며, 반능동 현가장치의 특성을 제약조건으로 모델링하기 위해  $\delta \in \{0, 1\}$  인 binary variable을 활용하여, 제어 알고리즘에 논리적 제약조건을 추가하였다.

$$\begin{aligned} \min_{U_N} J(x_k, U_N, W_N) &= \sum_{i=1}^N x_{k+i}^T Q x_{k+i} \\ \text{subject to. } \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \\ \text{passivity constraints (2)} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

이러한 제어 알고리즘은 식 (3)과 같이 Mixed-integer Quadratic Programming(MIQP)문제[2]로 재구성되며, 이를 풀기 위해 MATLAB에서 YALMIP, GUROBI를 사용하여, Half-car model에 기반한 현재 차량 정보  $x_k$ 와 전방의 노면 정보  $W_N = [w_k \ w_{k+1} \ \cdots \ w_{k+N-1}]^T$ 로부터 최적의 제어 입력  $U_N = [u_k \ u_{k+1} \ \cdots \ u_{k+N-1}]^T$ 을 연산한다.

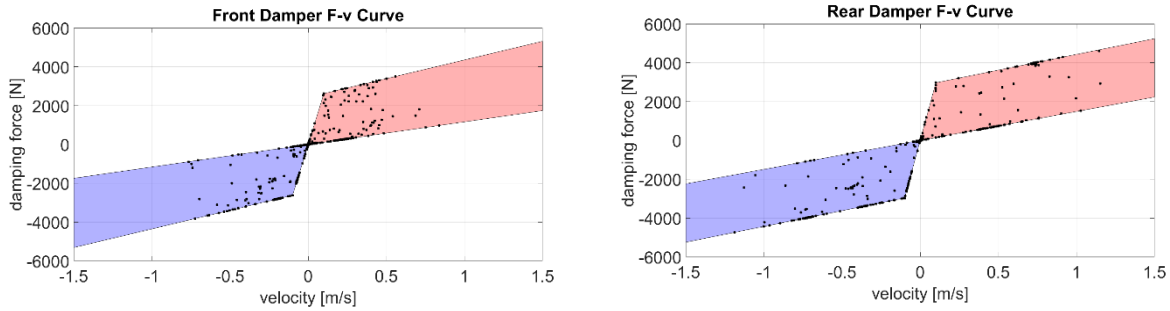


Fig. 3 Preview control input F-v curve

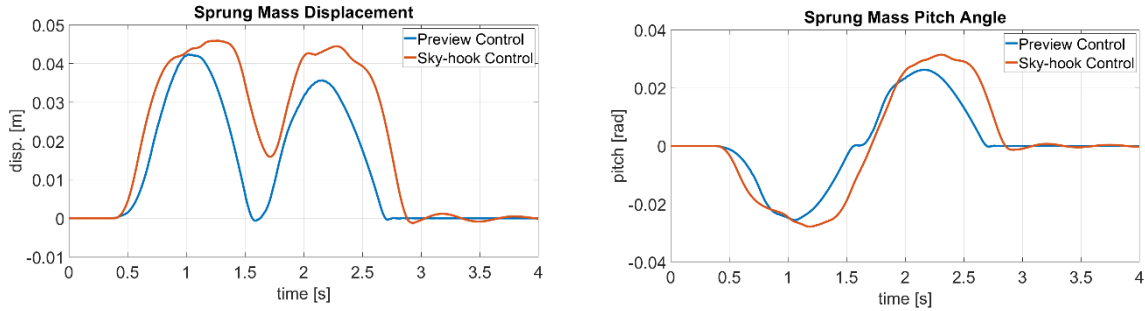


Fig. 4 Single bump simulation result

Fig. 3은 10 km/h의 속도로 길이 3.6 m, 높이 0.1 m의 single bump를 넘을 때의 preview 제어 입력이며, 식 (2)의 제약조건을 만족함을 확인하였다. Fig. 4는 시뮬레이션의 결과이며, sky-hook 제어 알고리즘과의 성능을 비교하였다.

## Reference

- [1] GANDHI, Puneet; ADARSH, S.; RAMACHANDRAN, K. I. Performance analysis of half car suspension model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS controllers. *Procedia Computer Science*, 2017, 115: 2-13.
- [2] NGUYEN, Manh-Quan, et al. A Model Predictive Control approach for semi-active suspension control problem of a full car. In: 2016 IEEE 55th conference on decision and control (CDC). IEEE, 2016. p. 721-726.