

건국대학교내 배달로봇 서스펜션 설계

시스템 설계 Term project

기계공학부 201610771 강승주

1. 선정 이유, 대상

선정 이유

최근 코로나 사태가 빠르게 진행되던 언택트화를 폭발적으로 진행시키는 계기가 됨. 대표적 언택트 산업인 배달 산업은 급격히 성장하는 중이며 4륜, 2륜 자동차 외에도 자전거, 도보, 전동 킥보드 등의 다양한 이송수단이 대중화 됨. 아마존, 피자헛 등의 다국적 기업들은 드론 등의 무인 수송에 많은 투자를 하고 있으며 점점 시장성이 보이고 있음.

국내 배달의 민족에서도 무인 주행 배달 로봇 ‘딜리’를 대학 캠퍼스등에서 시범 운영하여 타당성을 검토하였음. 따라서 배달 로봇의 서스펜션 설계는 유의미한 시도가 될 것임.

선정 대상

배달 로봇의 기본 스펙은 딜리와 유사한 **Starship Technology**의 **Starship** 로봇을 사용할 것임.

건국대학교는 평지가 많아 외란의 모델링이 평이하여 초기 설계가 용이함.

또한 사유지이기 때문에 법적 규제에서 상대적으로 자유로움. 따라서 건국대학교 내의 도로 주행을 가정.

2. 상세 스펙

상세 스펙



Starship

높이: 55.9 cm

길이: 68.6 cm

너비: 55.9 cm

무게: 20 kg

속력: 6 km/h

최대 이송 용량은 '딜리'의 데이터로부터 차체의 무게와 같은 20 kg, 20 L로 가정, 계산의 용이를 위해 차체를 직육면체, 20 L의 빈 공간으로 가정하여 부피와 밀도를 계산하면,

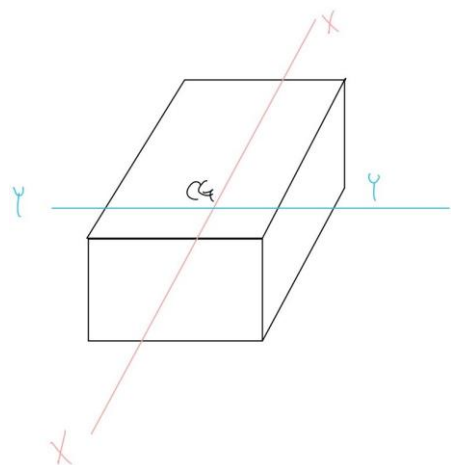
부피: 0.1943 m^3

밀도: 82.3 kg/m^3

3축 대칭을 가정하여 무게 중심을 정하고 질량 관성 모멘트 I_{xx} 와 I_{yy} 를 구하면, $I = 1/3 * \text{밀도} * \text{부피} * (\text{축에서 끝까지의 거리})^2$

$I_{xx} = 0.418 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$I_{yy} = 0.627 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$



3. 설계 지향

설계 지향

배달 로봇의 특성을 고려하여 설계 지향할 사항은

- 배달물에 가해지는 진동 최소화
- 유체 운반 경우 기울임 각도 고려
- 최소 재료 종류 사용으로 제조 단가 낮춤 필요

각도 고려

국물 요리, 커피 등 유체 운반 경우 유체의 기울임에 의한 용기내 최대 높이 도달로 배달 음식에 손상이 가거나 상품성이 떨어질 수 있음. 이를 위해 **full car model** 채용. 설계 용이를 위해 4 바퀴 모델로 변경.

차량 모델

사용 변수. 재료 종류 감소를 위
해 4개 각 서스펜션의 K_s , C_s ,
 K_w 같다고 가정. 속도 6 km/h
일 때 앞, 뒤 바퀴 입력 시간 차
0.41 sec 발생.

0.41 sec 발생.

4. 차량 모델

수학적 모델링

For vehicle body bounce motion (Sprung Mass):

$$\begin{aligned} M_s \ddot{Z}_{cg} = & -K_{sr1}(Z_{cg} - \theta a - \phi c - Z_{wr1}) - K_{sl1}(Z_{cg} - \theta a + \phi d - Z_{wl1}) \\ & -K_{sr2}(Z_{cg} + \theta b - \phi c - Z_{wr2}) - K_{sl2}(Z_{cg} + \theta b + \phi d - Z_{wl2}) \\ & -C_{sr1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wl2}) - C_{sl1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl1}) \\ & -C_{sr2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wl2}) - C_{sl2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_s \ddot{Z}_{cg} = & (-K_{sr1} - K_{sl1} - K_{sr2} - K_{sl2})Z_{cg} + (-C_{sr1} - C_{sl1} - C_{sr2} - C_{sl2})\dot{Z}_{cg} \\ & + (K_{sr1}a + K_{sl1}a - K_{sr2}b - K_{sl2}b)\theta + (C_{sr1}a + C_{sl1}a - C_{sr2}b - C_{sl2}b)\dot{\theta} \\ & + (K_{sr1}c - K_{sl1}d - K_{sr2}c + K_{sl2}d)\phi + (C_{sr1}c - C_{sl1}d + C_{sr2}c - C_{sl2}d)\dot{\phi} \\ & + (K_{sr1})Z_{wr1} + (K_{sl1})Z_{wl1} + (K_{sr2})Z_{wr2} + (K_{sl2})Z_{wl2} \\ & + (C_{sr1})\dot{Z}_{wr1} + (C_{sl1})\dot{Z}_{wl1} + (C_{sr2})\dot{Z}_{wr2} + (C_{sl2})\dot{Z}_{wl2} \end{aligned} \quad (1)$$

For Vehicle Body pitching motion (Sprung Mass):

$$\begin{aligned} I_{yy} \ddot{\theta} = & K_{sr1}(Z_{cg} - \theta a - \phi c - Z_{wr1})a + K_{sl1}(Z_{cg} - \theta a + \phi d - Z_{wl1})a \\ & -K_{sr2}(Z_{cg} + \theta b - \phi c - Z_{wr2})b - K_{sl2}(Z_{cg} + \theta b + \phi d - Z_{wl2})b \\ & -C_{sr1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wr1})a + C_{sl1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl1})a \\ & -C_{sr2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wr2})b - C_{sl2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl2})b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{yy} \ddot{\theta} = & (K_{sr1}a + K_{sl1}a - K_{sr2}b - K_{sl2}b)Z_{cg} + (C_{sr1}a + C_{sl1}a - C_{sr2}b - C_{sl2}b)\dot{Z}_{cg} \\ & + (-K_{sr1}a^2 - K_{sl1}a^2 - K_{sr2}b^2 - K_{sl2}b^2)\theta + (-C_{sr1}a^2 - C_{sl1}a^2 - C_{sr2}b^2 - C_{sl2}b^2)\dot{\theta} \\ & + (-K_{sr1}ac + K_{sl1}ad + K_{sr2}bc - K_{sl2}bd)\phi + (-C_{sr1}ac + C_{sl1}ad + C_{sr2}bc - C_{sl2}bd)\dot{\phi} \\ & + (-K_{sr1}a)Z_{wr1} + (-K_{sl1}a)Z_{wl1} + (K_{sr2}b)Z_{wr2} + (K_{sl2}b)Z_{wl2} \\ & + (-C_{sr1}a)\dot{Z}_{wr1} + (-C_{sl1}a)\dot{Z}_{wl1} + (C_{sr2}b)\dot{Z}_{wr2} + (C_{sl2}b)\dot{Z}_{wl2} \end{aligned} \quad (2)$$

For Vehicle Body rolling motion (Sprung Mass):

$$\begin{aligned} I_{xx} \ddot{\phi} = & K_{sr1}(Z_{cg} - \theta a - \phi c - Z_{wr1})c - K_{sl1}(Z_{cg} - \theta a + \phi d - Z_{wl1})d \\ & + K_{sr2}(Z_{cg} + \theta b - \phi c - Z_{wr2})c - K_{sl2}(Z_{cg} + \theta b + \phi d - Z_{wl2})d \\ & + C_{sr1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wr1})c - C_{sl1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl1})d \\ & + C_{sr2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b - \phi c - \dot{Z}_{wr2})c - C_{sl2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl2})d \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{xx} \ddot{\phi} = & (K_{sr1}c - K_{sl1}d + K_{sr2}c - K_{sl2}d)Z_{cg} + (C_{sr1}c - C_{sl1}d + C_{sr2}c - C_{sl2}d)\dot{Z}_{cg} \\ & + (-K_{sr1}ac + K_{sl1}ad + K_{sr2}bc - K_{sl2}bd)\theta + (-C_{sr1}ac + C_{sl1}ad + C_{sr2}bc - C_{sl2}bd)\dot{\theta} \\ & + (-K_{sr1}c^2 - K_{sl1}d^2 - K_{sr2}c^2 - K_{sl2}d^2)\phi + (-C_{sr1}c^2 - C_{sl1}d^2 - C_{sr2}c^2 - C_{sl2}d^2)\dot{\phi} \\ & + (-K_{sr1}c)Z_{wr1} + (K_{sl1}d)Z_{wl1} + (-K_{sr2}c)Z_{wr2} + (K_{sl2}d)Z_{wl2} \\ & + ((-C_{sr1}c)\dot{Z}_{wr1} + (C_{sl1}d)\dot{Z}_{wl1} + (-C_{sr2}c)\dot{Z}_{wr2} + (C_{sl2}d)\dot{Z}_{wl2}) \end{aligned} \quad (3)$$

For Front right wheel (Unsprung Mass):

$$\begin{aligned} M_{wr1} \ddot{Z}_{wr1} = & (K_{sr1})Z_{cg} + C_{sr1}\dot{Z}_{cg} + (-K_{sr1}a)\theta + (-C_{sr1}a)\dot{\theta} + (-K_{sr1}c)\phi \\ & + (-C_{sr1}c)\dot{\phi} + (-K_{sr1} - K_{wr1})Z_{wr1} + (-C_{sr1})\dot{Z}_{wr1} + K_{wr1}Z_{rr1} \\ \\ M_{wr1} \ddot{Z}_{wr1} = & K_{sr1}(Z_{cg} - \theta a - \phi c - Z_{wr1}) - K_{wr1}(Z_{wr1} - Z_{rr1}) \\ & + C_{sr1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wr1}) \end{aligned} \quad (4)$$

For Front left wheel (Unsprung Mass):

$$\begin{aligned} M_{wl1} \ddot{Z}_{wl1} = & (K_{sl1})Z_{cg} + C_{sl1}\dot{Z}_{cg} + (-K_{sl1}a)\theta + (-C_{sl1}a)\dot{\theta} + (K_{sl1}d)\phi \\ & + (C_{sl1}d)\dot{\phi} + (-K_{sl1} - K_{wl1})Z_{wl1} + (-C_{sl1})\dot{Z}_{wl1} + K_{wl1}Z_{rl1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{wl1} \ddot{Z}_{wl1} = & K_{sl1}(Z_{cg} - \theta a - \phi d - Z_{wl1}) - K_{wl1}(Z_{wl1} - Z_{rl1}) \\ & + C_{sl1}(\dot{Z}_{cg} - \dot{\theta} a + \dot{\phi} d - \dot{Z}_{wl1}) \end{aligned} \quad (5)$$

For Rear right wheel (Unsprung Mass):

$$\begin{aligned} M_{wr2} \ddot{Z}_{wr2} = & (K_{sr2})Z_{cg} + C_{sr2}\dot{Z}_{cg} + (K_{sr2}b)\theta + (C_{sr2}b)\dot{\theta} + (-K_{sr2}c)\phi \\ & + (-C_{sr2}c)\dot{\phi} + (-K_{sr2} - K_{wr2})Z_{wr2} + (-C_{sr2})\dot{Z}_{wr2} + K_{wr2}Z_{rr2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{wr2} \ddot{Z}_{wr2} = & K_{sr2}(Z_{cg} + \theta b - \phi c - Z_{wr2}) - K_{wr2}(Z_{wr2} - Z_{rr2}) \\ & + C_{sr2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b - \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wr2}) \end{aligned} \quad (6)$$

For Rear left wheel (Unsprung Mass):

$$\begin{aligned} M_{wl2} \ddot{Z}_{wl2} = & (K_{sl2})Z_{cg} + C_{sl2}\dot{Z}_{cg} + (K_{sl2}b)\theta + (C_{sl2}b)\dot{\theta} + (K_{sl2}d)\phi \\ & + (C_{sl2}d)\dot{\phi} + (-K_{sl2} - K_{wl2})Z_{wl2} + (-C_{sl2})\dot{Z}_{wl2} + K_{wl2}Z_{rl2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{wl2} \ddot{Z}_{wl2} = & K_{sl2}(Z_{cg} + \theta b + \phi d - Z_{wl2}) - K_{wl2}(Z_{wl2} - Z_{rl2}) \\ & + C_{sl2}(\dot{Z}_{cg} + \dot{\theta} b + \dot{\phi} c - \dot{Z}_{wl2}) \end{aligned} \quad (7)$$

4. 차량 모델

상태 공간 방정식

$$Z_{cg} = X_1$$

$$\dot{Z}_{cg} = X_2$$

$$\theta = X_3$$

$$\dot{\theta} = X_4$$

$$\phi = X_5$$

$$\dot{\phi} = X_6$$

$$Z_{wr1} = X_7$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A][X] + [B][U]$$

$$\dot{Z}_{wr1} = X_8$$

$$Z_{wl1} = X_9$$

$$\dot{Z}_{wl1} = X_{10}$$

$$Z_{wr2} = X_{11}$$

$$\dot{Z}_{wr2} = X_{12}$$

$$Z_{wl2} = X_{14}$$

$$\dot{Z}_{wl2} = X_{14}$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U]$$

$$[A] = [A1 \ A2 \ A3 \ A4 \ A5 \ A6 \ A7 \ A8 \ A9 \ A10 \ A11 \ A12 \ A13 \ A14]$$

$$A1 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A3 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A9 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$A11 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$A13 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$A10 = \begin{bmatrix} \frac{K_{sl1}}{m_{wl1}} \\ \frac{C_{sl1}}{m_{wl1}} \\ \frac{-K_{sla}}{m_{wl1}} \\ \frac{-C_{sl1}a}{m_{wl1}} \\ \frac{K_{sl1}d}{m_{wl1}} \\ \frac{C_{sl1}d}{m_{wl1}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{(-K_{sl1} - K_{wl1})}{m_{wl1}} \\ \frac{-C_{sl1}}{m_{wl1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A12 = \begin{bmatrix} \frac{K_{sr2}}{m_{wr2}} \\ \frac{C_{sr2}}{m_{wr2}} \\ \frac{K_{sr2}b}{m_{wr2}} \\ \frac{C_{sr2}b}{m_{wr2}} \\ \frac{-K_{sr2}c}{m_{wr2}} \\ \frac{-C_{sr2}c}{m_{wr2}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{(-K_{sr2} - K_{wr1})}{m_{wr2}} \\ \frac{-C_{sr2}}{m_{wr2}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A14 = \begin{bmatrix} \frac{K_{sl2}}{m_{wl2}} \\ \frac{C_{sl2}}{m_{wl2}} \\ \frac{K_{sl2}b}{m_{wl2}} \\ \frac{C_{sl2}b}{m_{wl2}} \\ \frac{K_{sl2}d}{m_{wl2}} \\ \frac{C_{sl2}d}{m_{wl2}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{(-K_{sl2} - K_{wl2})}{m_{wl2}} \\ \frac{-C_{sl2}}{m_{wl2}} \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A8 = \begin{bmatrix} \frac{K_{sr1}}{m_{wr1}} \\ \frac{C_{sr1}}{m_{wr1}} \\ \frac{-K_{sr1}a}{m_{wr1}} \\ \frac{-C_{sr1}a}{m_{wr1}} \\ \frac{-K_{sr1}c}{m_{wr1}} \\ \frac{-C_{sr1}c}{m_{wr1}} \\ \frac{(-K_{sr1} - K_{rr1})}{m_{wr1}} \\ \frac{-C_{sr1}}{m_{wr1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A2 = \begin{bmatrix} \frac{(-K_{sr1} - K_{sl1} - K_{sr2} - K_{sl2})}{m_s} \\ \frac{(-C_{sr1} - C_{sl1} - C_{sr2} - C_{sl2})}{m_s} \\ \frac{(K_{sr1}a + K_{sl1}a - K_{sr2}b - K_{sl2}b)}{m_s} \\ \frac{(C_{sr1}a + C_{sl1}a - C_{sr2}b - C_{sl2}b)}{m_s} \\ \frac{(K_{sr1}c - K_{sl1}d + K_{sr2}c - K_{sl2}d)}{m_s} \\ \frac{(C_{sr1}c - C_{sl1}d + C_{sr2}c - C_{sl2}d)}{m_s} \\ \frac{K_{sr1}}{m_s} \\ \frac{C_{sr1}}{m_s} \\ \frac{K_{sl1}}{m_s} \\ \frac{C_{sl1}}{m_s} \\ \frac{K_{sr2}}{m_s} \\ \frac{C_{sr2}}{m_s} \\ \frac{K_{sl2}}{m_s} \\ \frac{C_{sl2}}{m_s} \\ \frac{K_{sl2}}{m_s} \end{bmatrix}^T$$

$$A4 = \begin{bmatrix} \frac{(K_{sr1}a + K_{sl1}a - K_{sr2}b - K_{sl2}b)}{I_{yy}} \\ \frac{(C_{sr1}a + C_{sl1}a - C_{sr2}b - C_{sl2}b)}{I_{yy}} \\ \frac{(-K_{sr1}a^2 - K_{sl1}a^2 - K_{sr2}b^2 - K_{sl2}b^2)}{I_{yy}} \\ \frac{(-C_{sr1}a^2 - C_{sl1}a^2 - C_{sr2}b^2 - C_{sl2}b^2)}{I_{yy}} \\ \frac{(-K_{sr1}ac + K_{sl1}ad + K_{sr2}bc - K_{sl2}bd)}{I_{yy}} \\ \frac{(-C_{sr1}ac - C_{sl1}ad - C_{sr2}bc - C_{sl2}bd)}{I_{yy}} \\ \frac{-K_{sr1}a}{I_{yy}} \\ \frac{-C_{sr1}a}{I_{yy}} \\ \frac{-K_{sl1}a}{I_{yy}} \\ \frac{-C_{sl1}a}{I_{yy}} \\ \frac{K_{sr2}b}{I_{yy}} \\ \frac{C_{sr2}b}{I_{yy}} \\ \frac{K_{sl2}b}{I_{yy}} \\ \frac{C_{sl2}b}{I_{yy}} \\ \frac{K_{sl2}b}{I_{yy}} \end{bmatrix}^T$$

$$A6 = \begin{bmatrix} \frac{(K_{sr1}c - K_{sl1}d + K_{sr2}c - K_{sl2}d)}{I_{xx}} \\ \frac{(C_{sr1}c - C_{sl1}d + C_{sr2}c - C_{sl2}d)}{I_{xx}} \\ \frac{(-K_{sr1}ac + K_{sl1}ad + K_{sr2}bc - K_{sl2}bd)}{I_{xx}} \\ \frac{(-C_{sr1}ac - C_{sl1}ad - C_{sr2}bc - C_{sl2}bd)}{I_{xx}} \\ \frac{(-K_{sr1}c^2 - K_{sl1}d^2 - K_{sr2}c^2 - K_{sl2}d^2)}{I_{xx}} \\ \frac{(-C_{sr1}c^2 - C_{sl1}d^2 - C_{sr2}c^2 - C_{sl2}d^2)}{I_{xx}} \\ \frac{-K_{sr1}c}{I_{xx}} \\ \frac{-C_{sr1}c}{I_{xx}} \\ \frac{K_{sl1}d}{I_{xx}} \\ \frac{C_{sl1}d}{I_{xx}} \\ \frac{-K_{sr2}c}{I_{xx}} \\ \frac{-C_{sr2}c}{I_{xx}} \\ \frac{K_{sl2}d}{I_{xx}} \\ \frac{C_{sl2}d}{I_{xx}} \\ \frac{K_{sl2}d}{I_{xx}} \end{bmatrix}^T$$

4. 차량 모델

상태 공간 방정식

```
B = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; Kw/Mw 0 0 0; 0 0 0 0; 0 Kw/Mw 0 0; 0 0 0 0; 0 0 Kw/Mw 0; 0 0 0 0; 0 0 0 Kw/Mw];
U = [Zrr1; Zrl1; Zrr2; Zrl2];

C1 = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
C2 = [0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
C3 = [0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0];
C4 = [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0];
C5 = [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
C6 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];
C7 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1];
C = [C1;C2;C3;C4;C5;C6;C7];
D = [0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0;0 0 0 0];
```

설계 상수

결정된 상세 스펙으로부터 설계 상수 결정. 기본 상태의 총 질량 20 kg을 현가하질량/현가상질량 = 0.2로 가정하여 M_s , M_w 값을 정하고 4 개의 타이어의 강성 K_w 를 상수로 가정.

M_s (현가상질량): 16 kg $c=d$: 0.28 m

K_w^2 (타이어의 강성): 100000 N/m

M_w : 1 kg

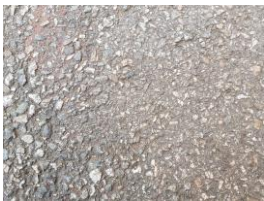
I_{xx} : 0.42 kg*m²

$a=b$: 0.34 m

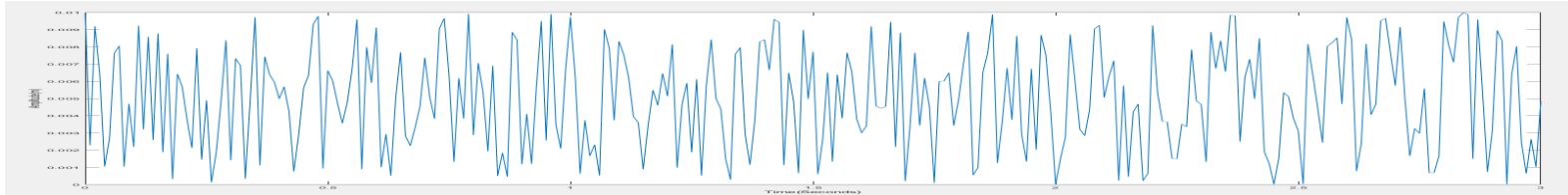
I_{yy} : 0.63 kg*m²

5. 외란 모델

거친 도로



일반적인 거친 도로에 대하여 최대 크기 1 cm의 Random Signal을 생성하여 모델링.³



오름 턱



높이 10 cm, 길이 40 cm 오름 턱 Ramp형 함수로 모델링 0.41 sec 입력 시간차



땅 꺼짐,
지면 결함



크기 10 cm, 지속 시간 0.1 sec의 Impulse형 함수로 모델링. 0.41 sec 입력 시간차



5. 외란 모델

한쪽 바퀴
꺼짐

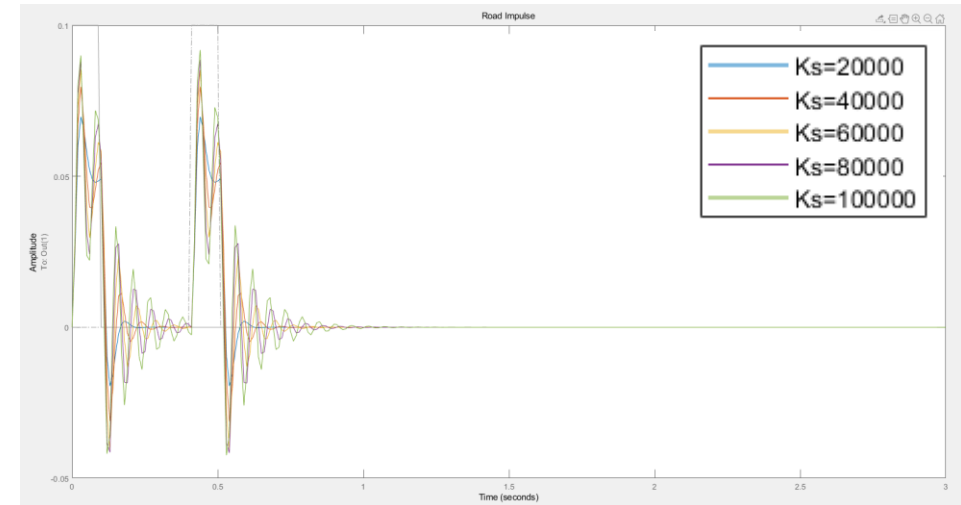
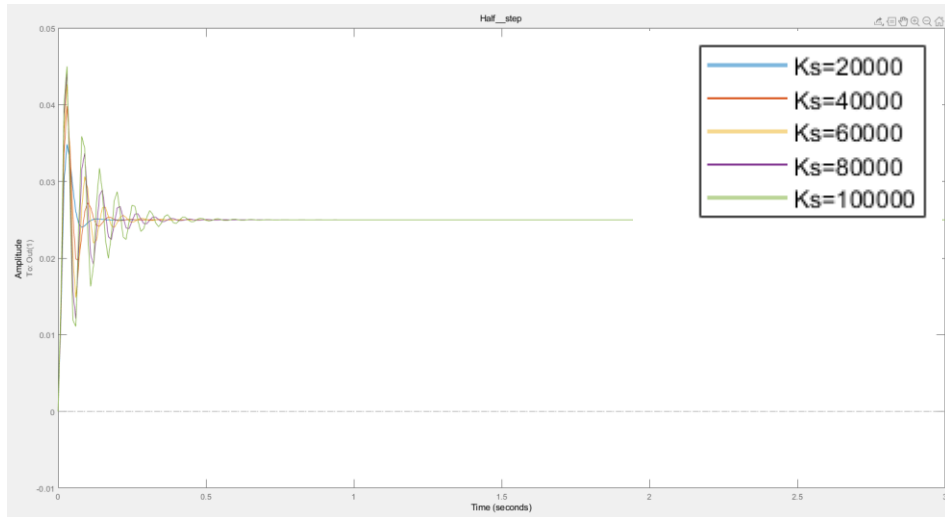
4 바퀴 중 한쪽 측면에만 5 cm step형 입력으로 모델링,



6. 시간축 응답 관찰

스프링 계수 K_s 변화에 대한 관찰

감쇠계수 $C_s = 400 \text{ kg/s}$ 일 때

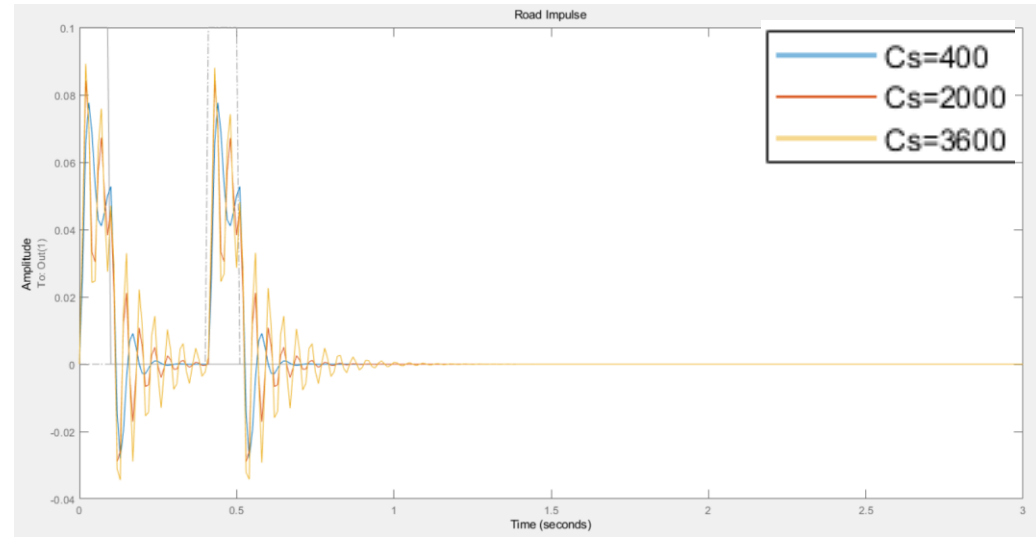
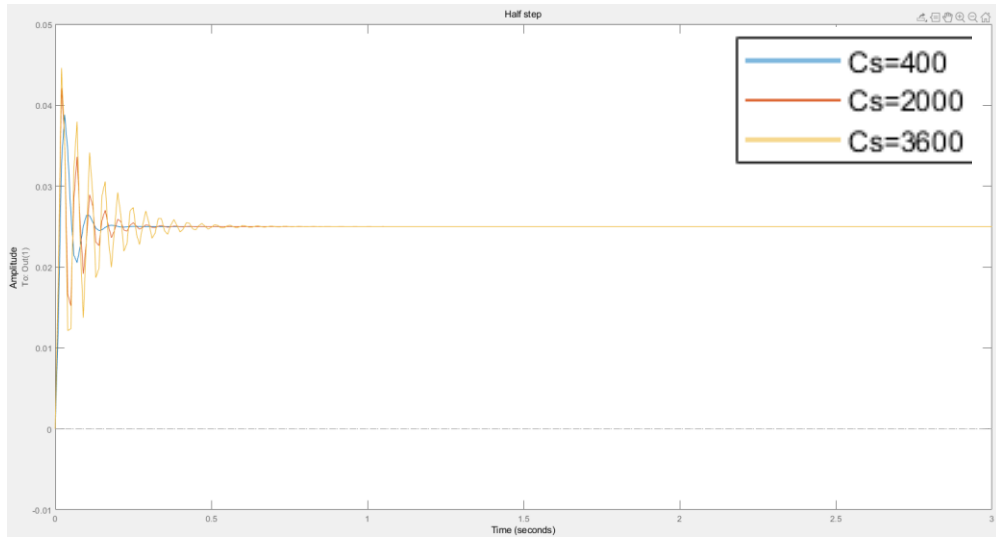


K_s 값을 증가시키면 따라 스텝형 입력과 임펄스형 입력에 대해 진폭, 진동 횟수, 수렴시간이 증가함. K_s 값을 유연하게 조절하는 방향으로 조정.

6. 시간축 응답 관찰

감쇠계수 C_s 변화에 대한 관찰

스프링 상수 $K_s = 35000 \text{ N/m}$ 일 때

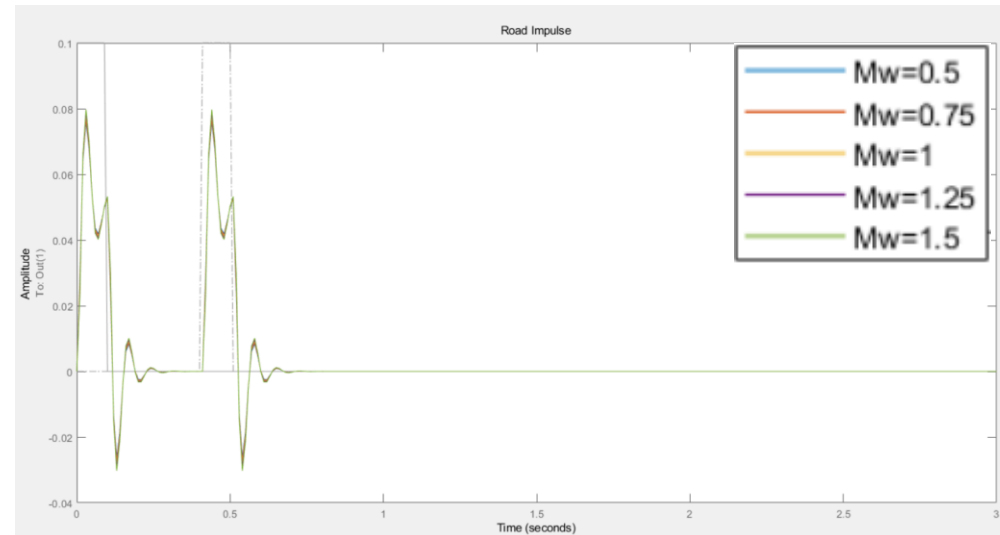
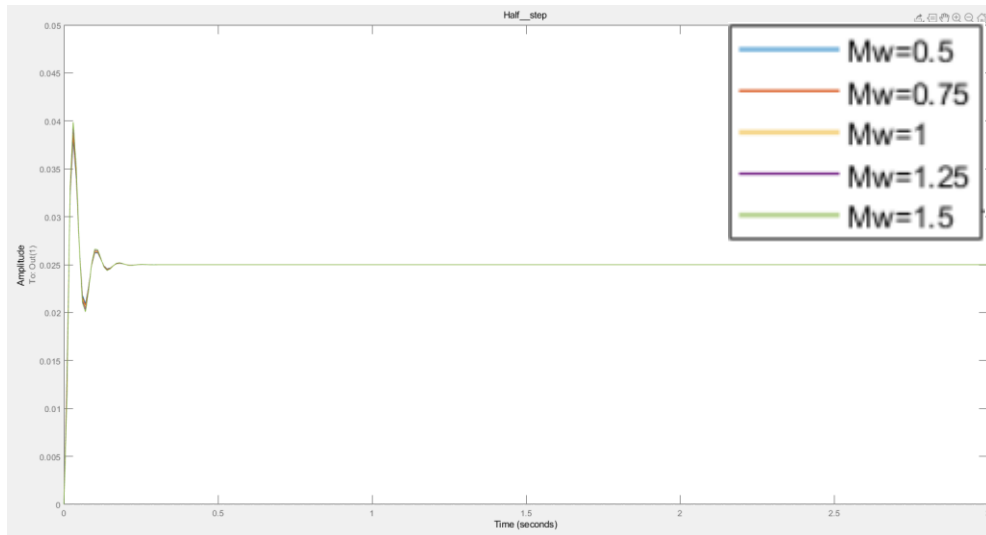


C_s 값을 증가시키면 따라 스텝형 입력과 임펄스형 입력에 대해 진폭, 진동 횟수, 수렴시간이 증가함. C_s 값을 유연하게 조절하는 방향으로 조정.

6. 시간축 응답 관찰

현가하질량 M_w 변화에 대한 관찰

스프링 상수 $K_s = 35000$ N/m, 감쇠계수 $C_s = 400$ kg/s 일 때

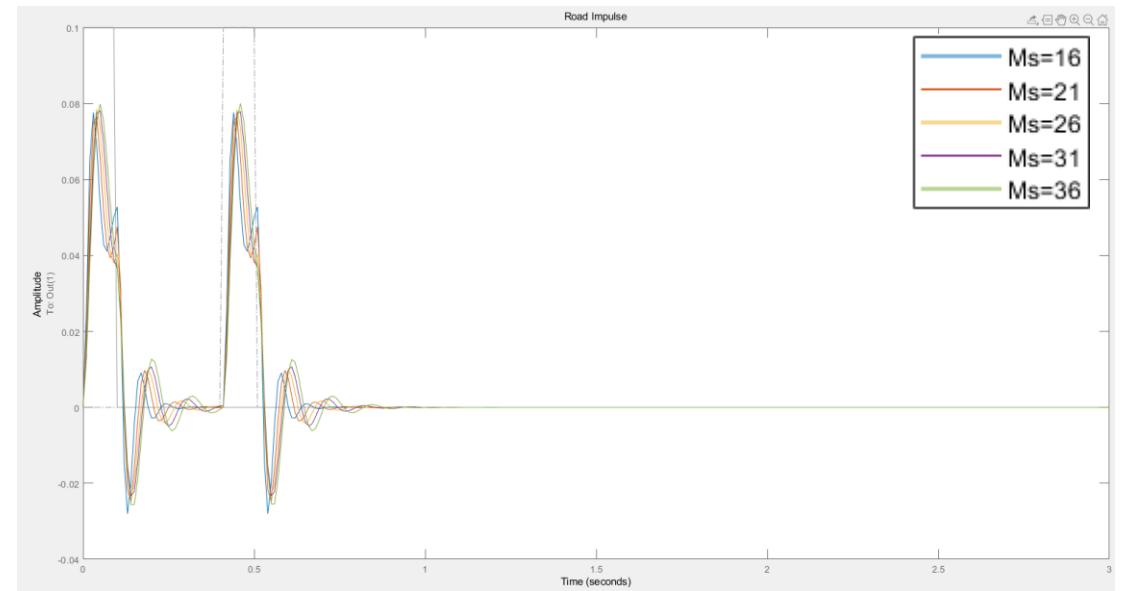
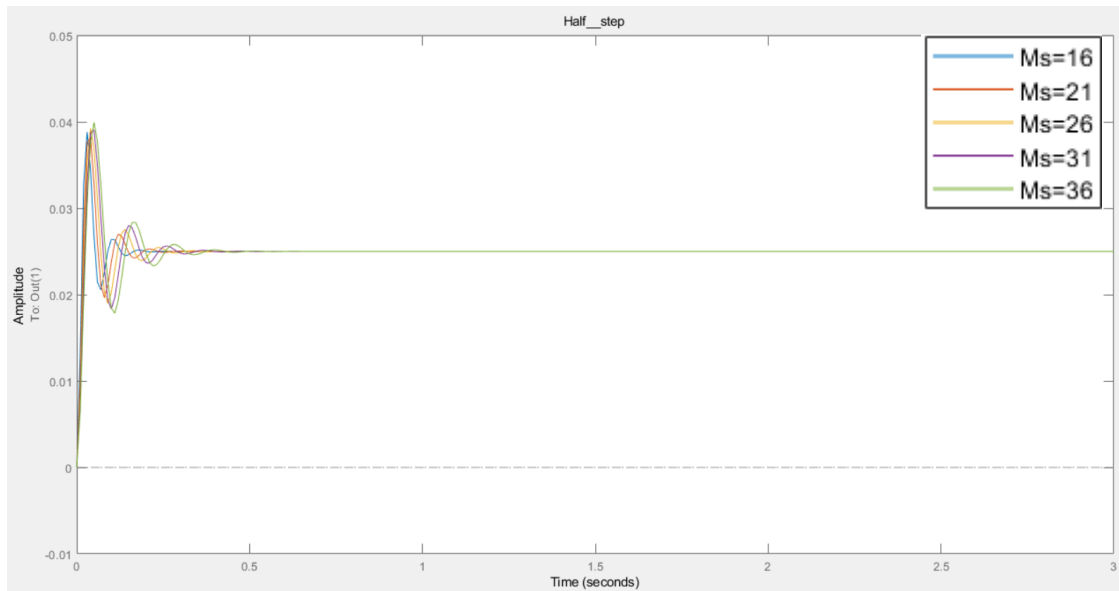


현재 시스템에서 현가하 질량 M_w 를 변화시키더라도 응답에 유의미한 개선이 관찰되지 않음.

6. 시간축 응답 관찰

현가상질량 M_s 변화에 대한 관찰

스프링 상수 $K_s = 35000$ N/m, 감쇠계수 $C_s = 400$ kg/s 일 때

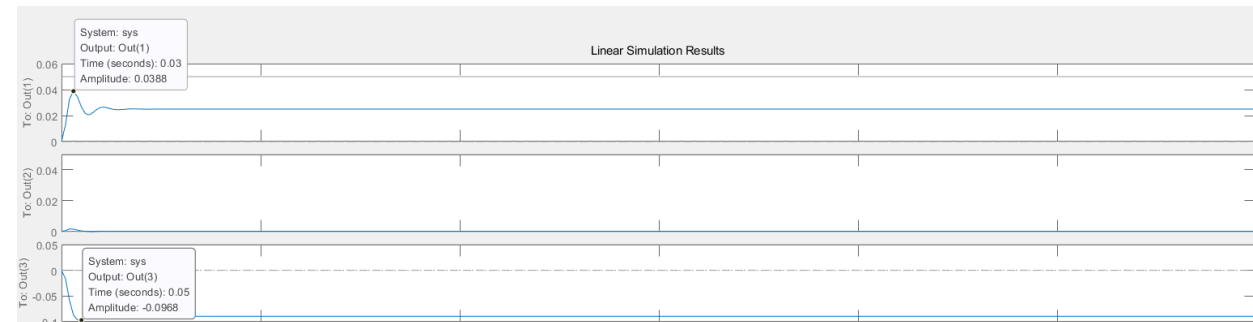
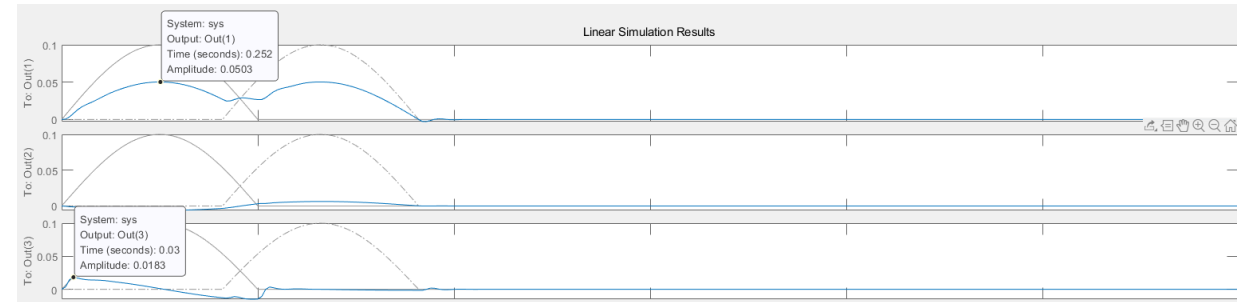
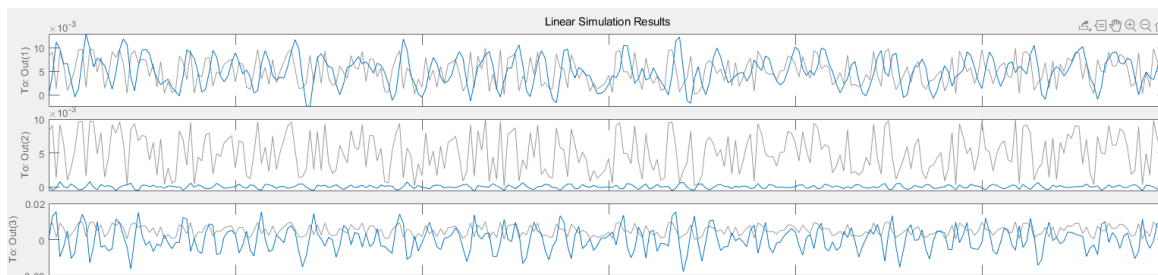
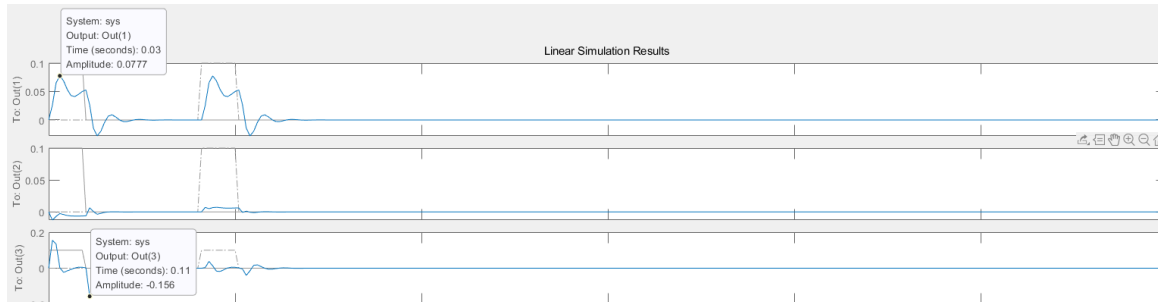
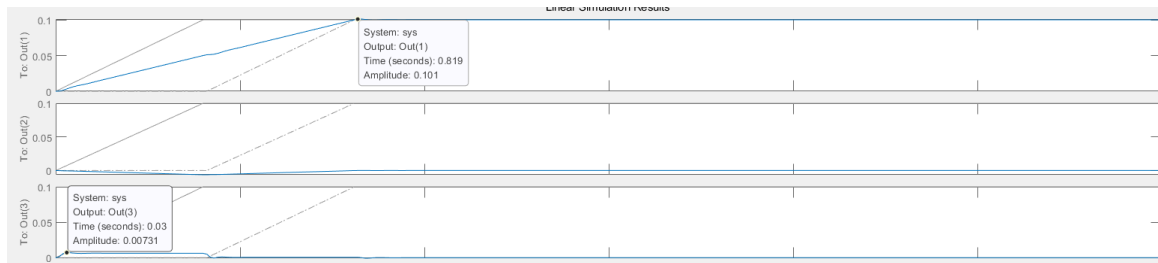


배달음식이 실린 경우 현가상질량 M_s 가 증가하여 수렴이 늦어지나 최대 용량이 실린 $M_s = 36$ kg 인 경우에도 일관된 반응을 보임.

6. 시간축 응답 관찰

결정된 스펙에 대한 응답 관찰

$K_s = 35000$, $C_s = 400$, $M_w = 16 \text{ kg}$, $M_s = 1 \text{ kg}$ 일 때의 응답 관찰



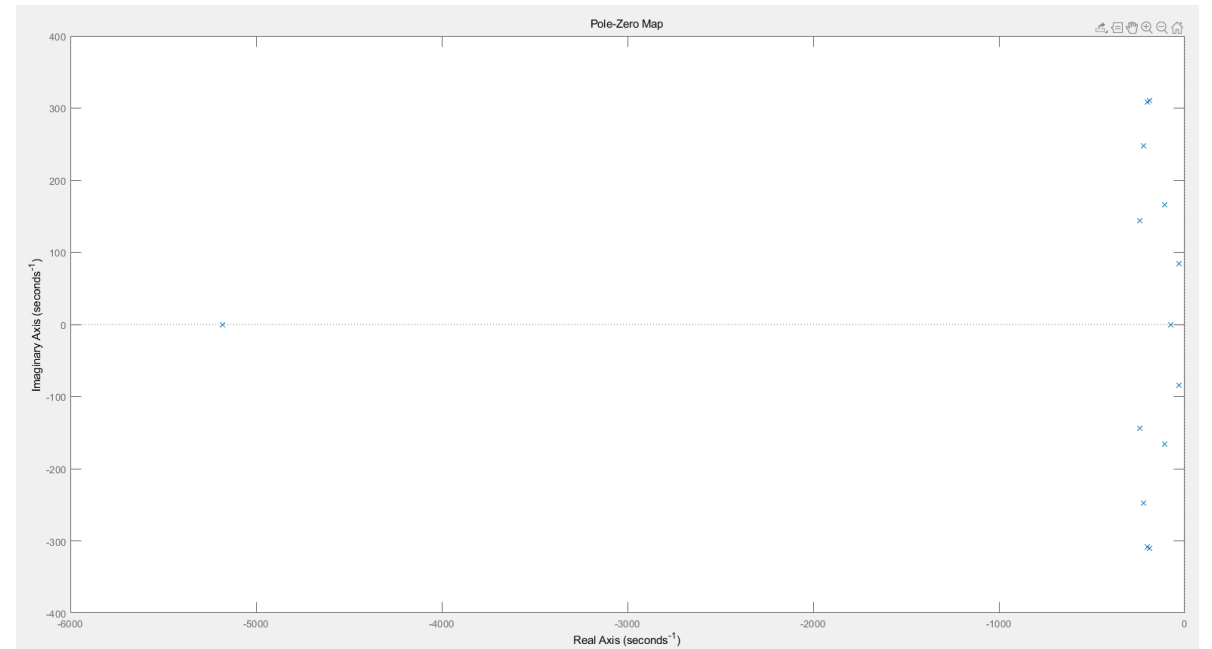
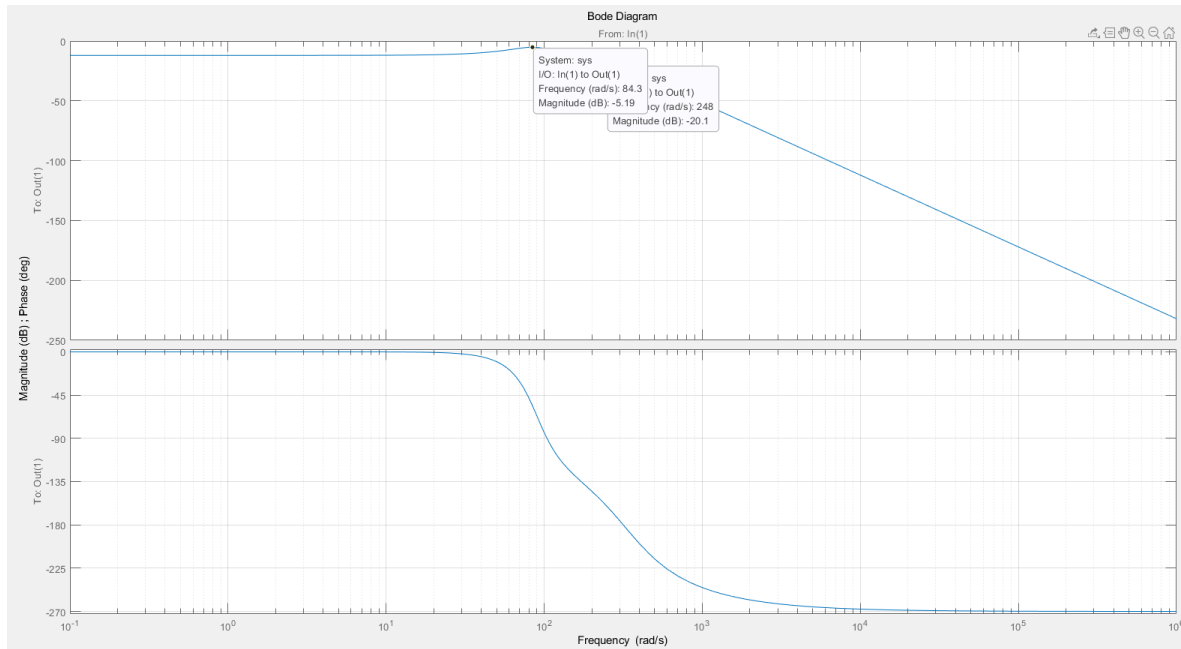
(좌) Ramp형, Impulse형, Noise형 응답

(우) Sine형, Step형 응답

7. 주파수축 응답 관찰

결정된 스펙에 대한 응답 관찰

$K_s = 35000$, $C_s = 400$, $M_w = 16$ kg, $M_s = 1$ kg 일 때의 응답 관찰



(좌) Bode plot (우) pole – zero plot.

7. 주파수축 응답 관찰

결정된 스펙에 대한 응답 관찰

$K_s = 35000$, $C_s = 400$, $M_w = 16$ kg, $M_s = 1$ kg 일 때의 응답 관찰

Pole	Damping	Frequency (rad/seconds)	Time Constant (seconds)
-7.66e+01	1.00e+00	7.66e+01	1.30e-02
-2.95e+01 + 8.43e+01 i	3.31e-01	8.93e+01	3.38e-02
-2.95e+01 - 8.43e+01 i	3.31e-01	8.93e+01	3.38e-02
-1.06e+02 + 1.66e+02 i	5.38e-01	1.97e+02	9.46e-03
-1.06e+02 - 1.66e+02 i	5.38e-01	1.97e+02	9.46e-03
-2.40e+02 + 1.44e+02 i	8.58e-01	2.80e+02	4.16e-03
-2.40e+02 - 1.44e+02 i	8.58e-01	2.80e+02	4.16e-03
-2.20e+02 + 2.47e+02 i	6.66e-01	3.31e+02	4.54e-03
-2.20e+02 - 2.47e+02 i	6.66e-01	3.31e+02	4.54e-03
-1.88e+02 + 3.11e+02 i	5.18e-01	3.63e+02	5.31e-03
-1.88e+02 - 3.11e+02 i	5.18e-01	3.63e+02	5.31e-03
-2.00e+02 + 3.08e+02 i	5.44e-01	3.67e+02	5.00e-03
-2.00e+02 - 3.08e+02 i	5.44e-01	3.67e+02	5.00e-03
-5.18e+03	1.00e+00	5.18e+03	1.93e-04

8. 참고문헌

¹Mitra , N. Benerjee , H. A. Khalane , M. A. Sonawane , D. R. Joshi , G.R. Bagul, Simulation and Analysis of Full Car Model for various Road profile on a analytically validated MATLAB/SIMULINK model

²K Ramji, V K Goel and V H Saran, Stiffness properties of small-size pneumatic tyres

³박호용, 허승진, 차량 동역학, 문운당, 2001