

MR 댐퍼 LQR 제어 및 구조 안전성 해석



미래자동차공학과 2021057029 김도경
미래자동차공학과 2022050873 차혜민



☑️☐ 목차

1. 프로젝트 선정 배경
2. 역할 분담
3. MR 댐퍼 및 Bouc-Wen 모델 소개
4. Quarter-Car SIMULINK 모델링 과정 (passive/ general bouc-wen/modified bouc-wen)
5. LQR 제어 설계 및 적용 (MATLAB and SIMULINK)
6. 모델별 시뮬레이션 결과 비교
7. COMSOL 해석
8. 결과 분석
9. 결론

☑️ 二 프로젝트 선정 배경

- 기존 패시브 댐퍼는 노면 변화에 바로 대응하기 어려워 승차감·안정성에 한계가 있음
- 전류로 감쇠력을 조절할 수 있는 MR 댐퍼가 대안으로 주목되고 있음
- MR 댐퍼에 LQR 제어를 적용해 최적 감쇠력을 실시간으로 계산해서 승차감/노면 안정성 등의 성능 향상을 확인
- COMSOL을 이용해 물리적 거동을 검증



☑ — 역할 분담
○ —

김도경

<MATLAB/SIMULINK>

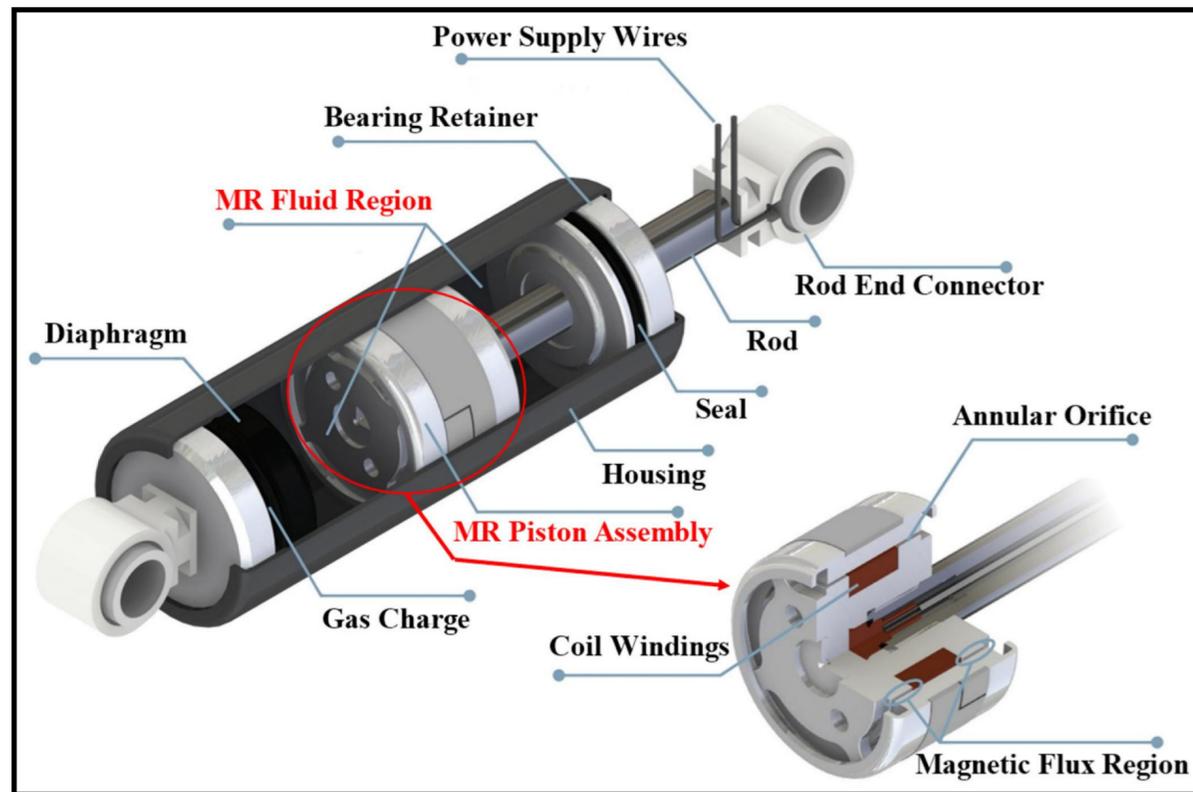
- Passive model, modified bouc-wen model simulink
- Matlab 활용한 lqr control 코드 구현

차혜민

<COMSOL 해석>

- General bouc-wen model Simulink
- Comsol thermal, magnetic, flow analysis

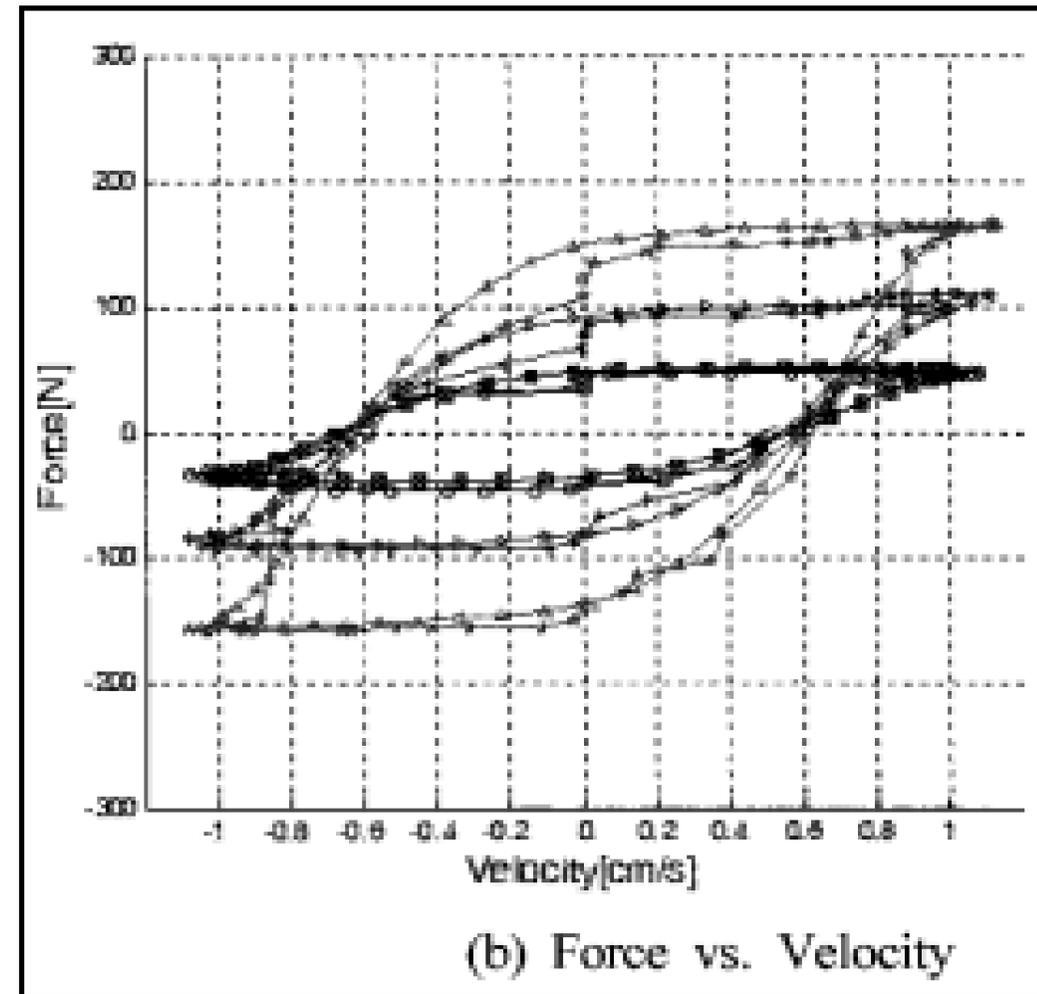
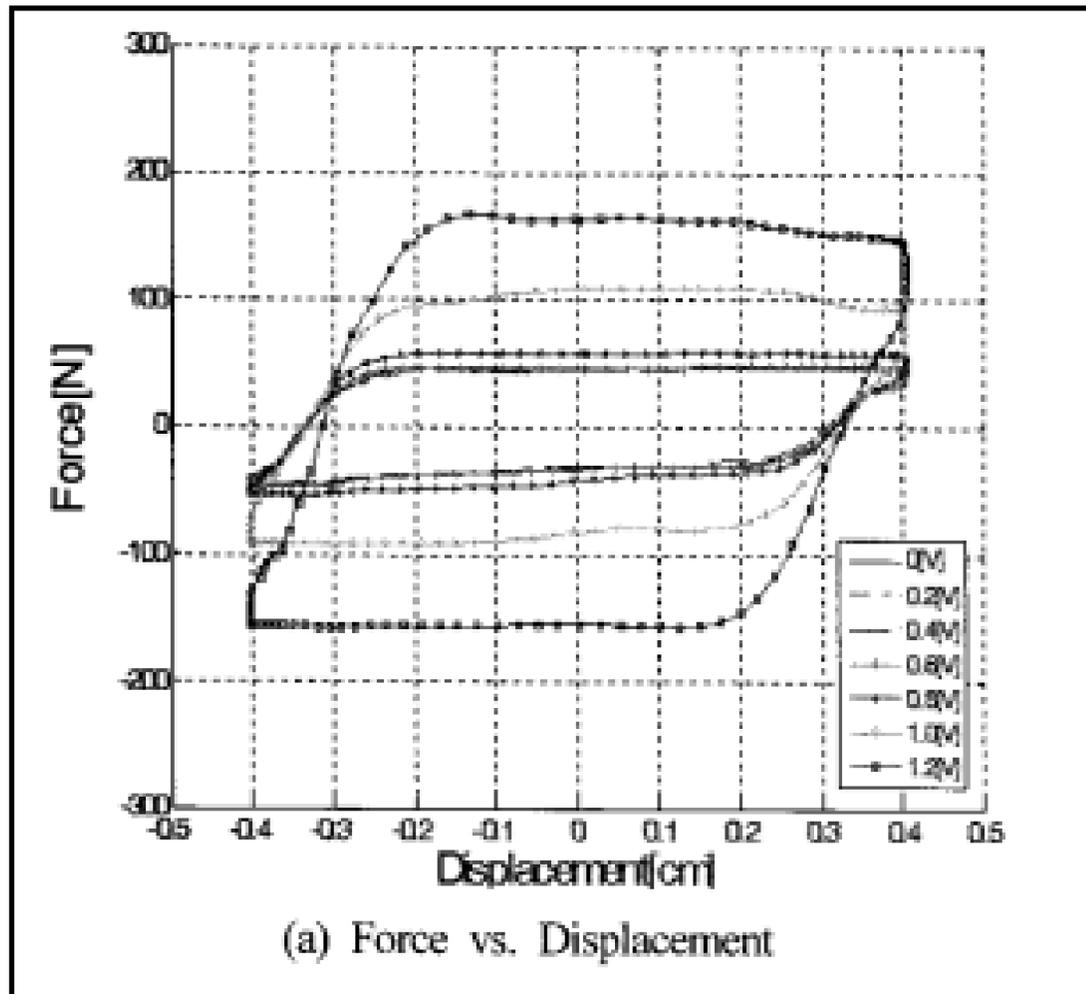
MR 댐퍼란?



<MR(Magneto-Rheological) damper>

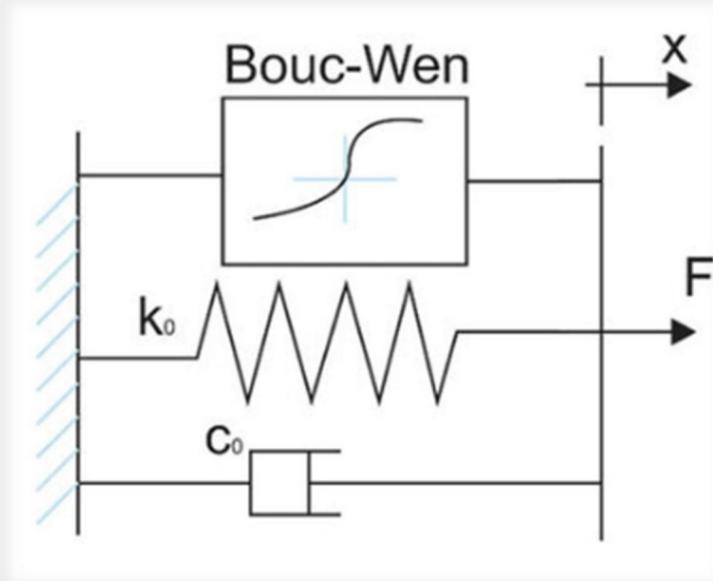
- 전류로 자기장을 가하면 MR 유체의 점성과 항복응력이 증가하여 감쇠력이 변화하는 댐퍼
- 기존 패시브 댐퍼와 달리 감쇠력을 실시간으로 조절할 수 있음
- 내부의 코일에서 생성된 자기장이 피스톤 주변 MR 유체의 흐름을 제어하여 비선형 히스테리시스 특성을 나타냄
- 이러한 특성을 모델링하기 위해 Bouc-Wen 기반 수학 모델이 활용됨
- 차량 서스펜션에 적용 시 승차감·안정성 향상에 큰 효과를 보임

hysteresis?

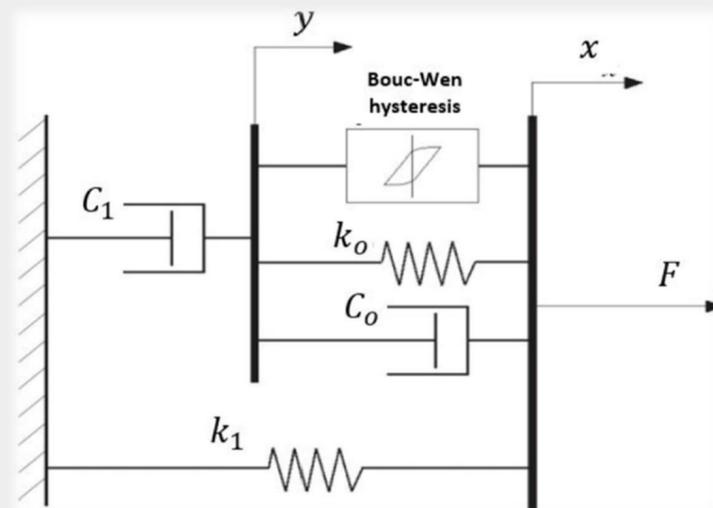


Bouc-wen 모델이란?

- 댐퍼가 가지는 비선형 히스테리시스 특성을 수학적으로 표현하기 위한 모델
- MR 댐퍼처럼 전류·속도·변위에 따라 감쇠력이 비선형으로 변하는 시스템을 표현하는 데 널리 사용됨



<general bouc-wen model>



<modified bouc-wen model>

차이점?

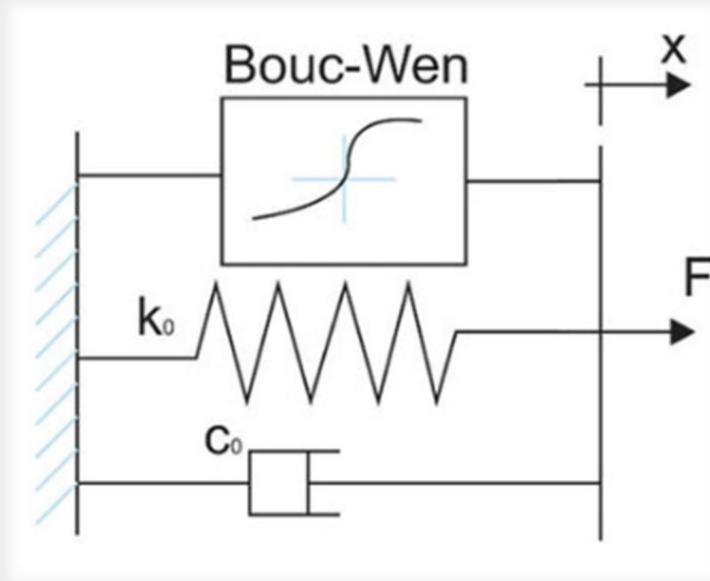
General Bouc-Wen model

- 단일 히스테리시스 요소로 기본적인 비선형 감쇠 특성만 표현
- 하지만 항복 전과 항복 후의 강성 차이를 표현하지 못함

Modified Bouc-Wen model

- k_1, c_1 와 같이 항복 후의 탄성·감쇠 요소 추가
- MR 댐퍼의 항복 전(pre-yield)·항복 후 영역(post-yield)에 따른 거동을 더 정확하게 모사

[General bouc-wen model]



<general bouc-wen model>

$$F = k_0x + c_0\dot{x} + az$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n$$

k_0 : 선형 스프링 계수

c_0 : 선형 점성 계수

z : 히스테리시스 상태 변수

a : 히스테리시스 성분 크기 계수

A : 히스테리시스 입력 스케일 계수

β : 히스테리시스 루프 수축/경도 조절 계수

γ : 히스테리시스 루프 형태·비대칭 조절 계수

n : 히스테리시스 비선형 지수

[Modified bouc-wen model]

$$f_{MR} = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y})$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y) \}$$

α : 히스테리시스 성분 크기 계수

k_0 : 선형 스프링 계수(항복전)

k_1 : 비선형 스프링 계수(항복후)

c_0 : 기본 점성 감쇠 계수

c_1 : 내부 보조 감쇠 계수

A : 히스테리시스 입력 스케일 계수

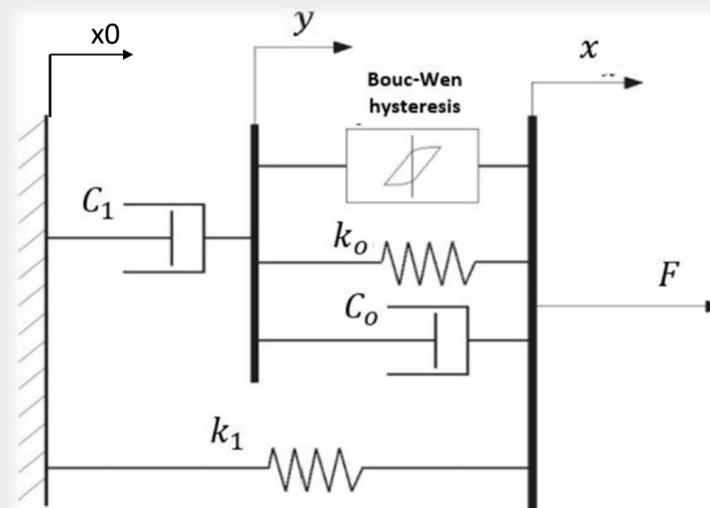
β : 히스테리시스 루프 수축 조절 계수

γ : 히스테리시스 루프 형태·비대칭 조절 계수

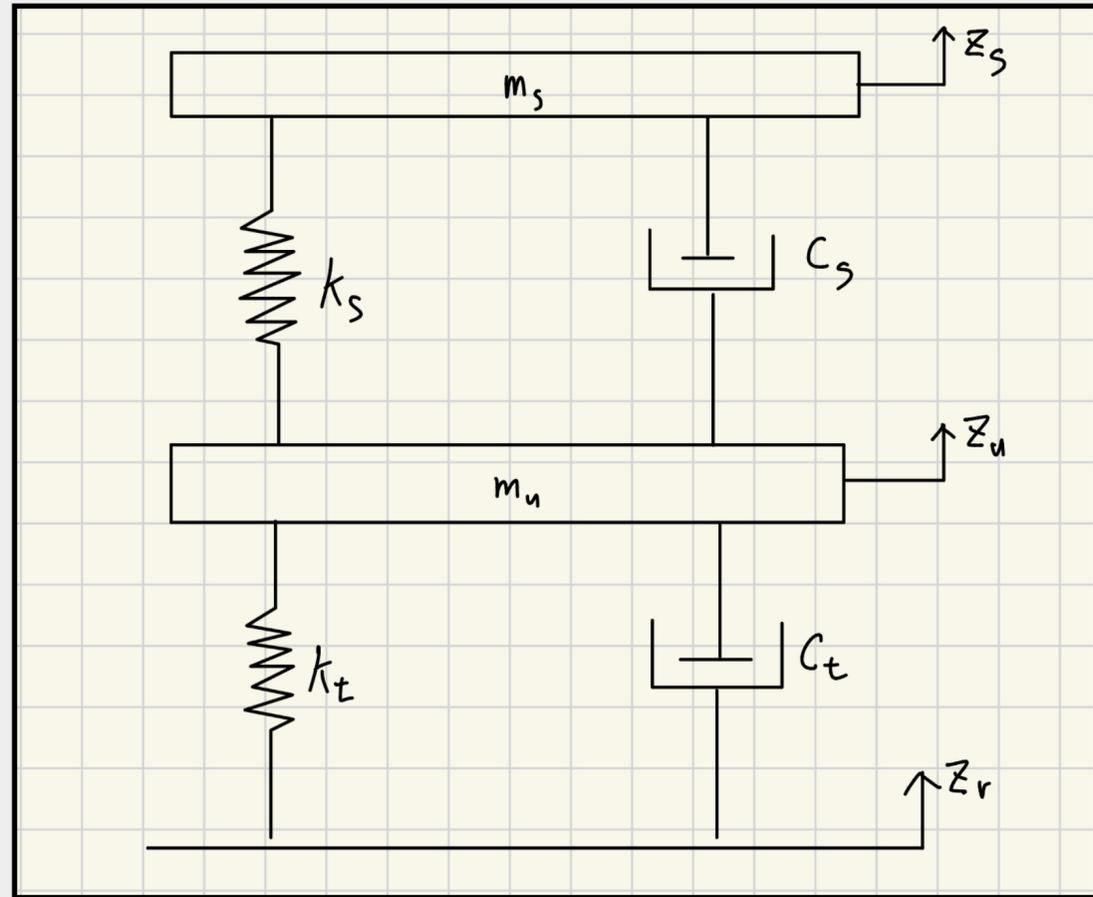
n : 히스테리시스 비선형 지수

z : 히스테리시스 상태 변수

y : 내부 변위 상태 변수(프리/포스트 구간 구분용)

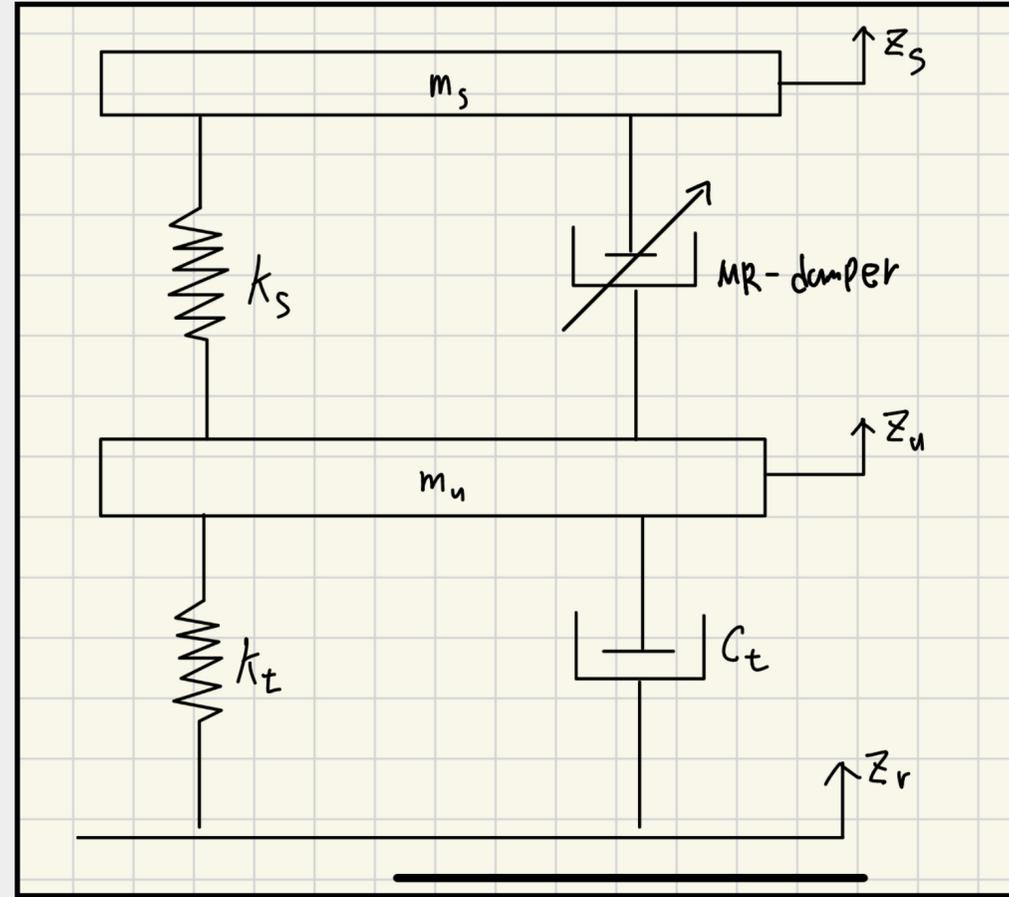


<modified bouc-wen model>



<Passive quarter car model>

“고정된 스프링·댐퍼로 구성된 기본 서스펜션 모델로, 감쇠력을 조절할 수 없는 수동 시스템이다.”



<Semi-active MR damper quarter car model>

“전류 입력으로 감쇠력을 조절할 수 있는 MR 댐퍼를 포함한 반능동 서스펜션 모델이다.”

- 파라미터 정의
- m_s : 차체 질량 (Sprung mass)
 - m_u : 바퀴·서스펜션 하부 질량 (Unsprung mass)
 - k_s : 서스펜션 스프링 강성 (Suspension stiffness)
 - c_s : 서스펜션 댐퍼 계수 (Suspension damping)
 - k_t : 타이어 강성 (Tire stiffness)
 - c_t : 타이어 점성/댐핑 (Tire damping)
 - z_s : 차체 변위
 - z_u : 휠 변위
 - z_r : 노면 입력

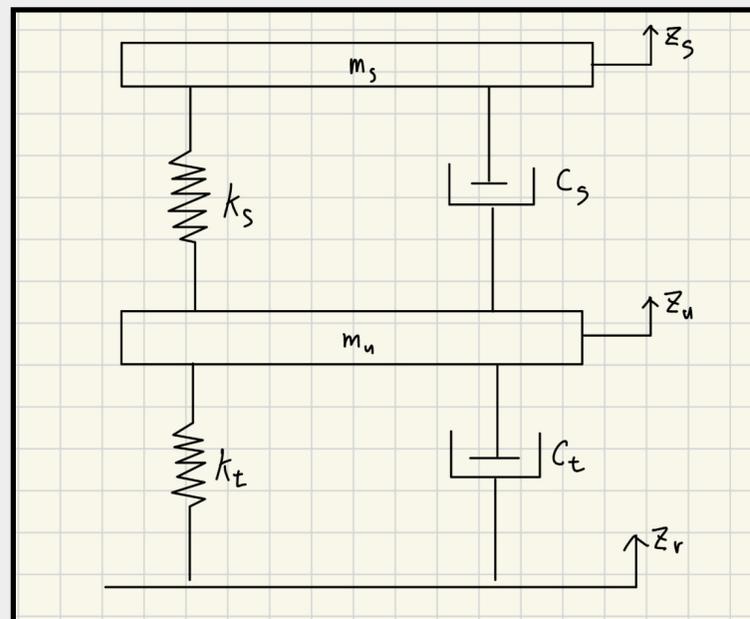


<Hyundai i20>

Table 3: Parameters of quarter passive suspension system

System parameter	Value
Sprung mass (m_x)	450kg
Unsprung mass (m_u)	45kg
Suspension stiffness(k_s)	300N/cm
Damping coefficient (c_s)	7.50Ns/cm
Tire Suspension stiffness(k_t)	2000N/cm
Tire Damping coefficient (c_t)	1.25Ns/cm

“실제 소형 승용차(i20)의 쿼터카 파라미터를 사용”



<Equation of motion>

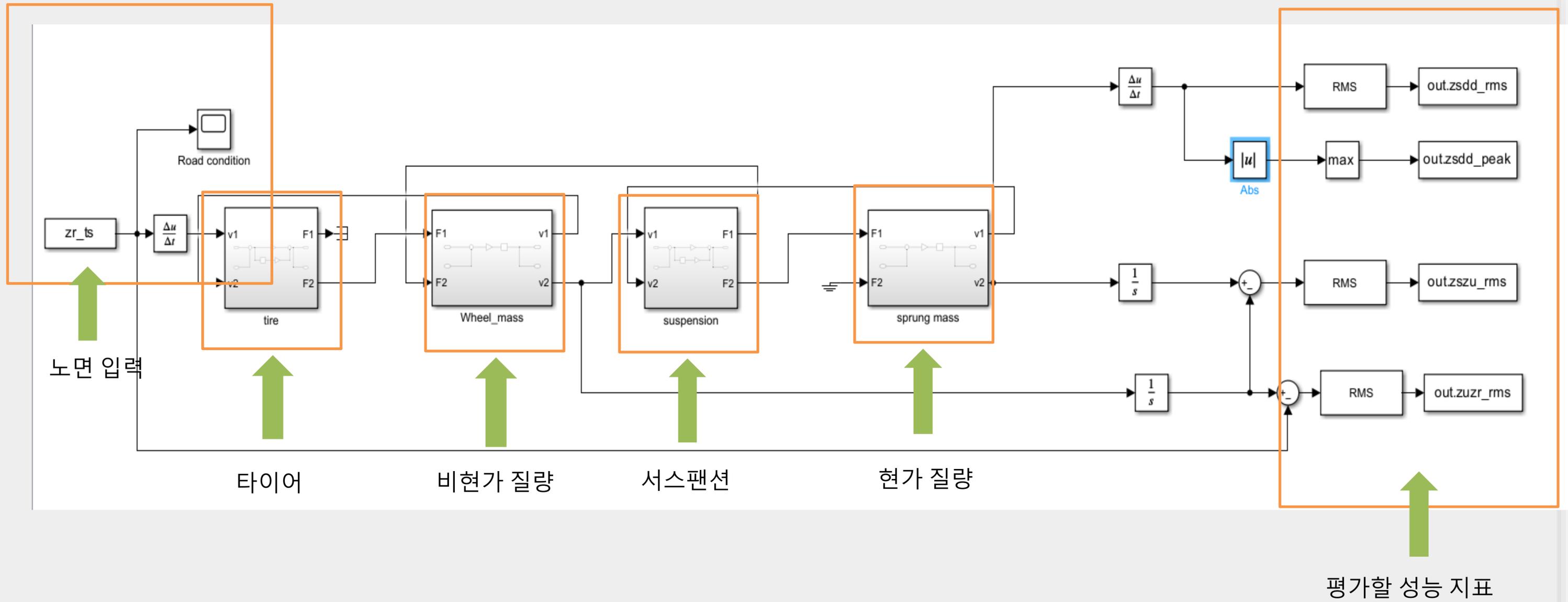
$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u).$$

<현가질량(m_s)에 대한 운동방정식>

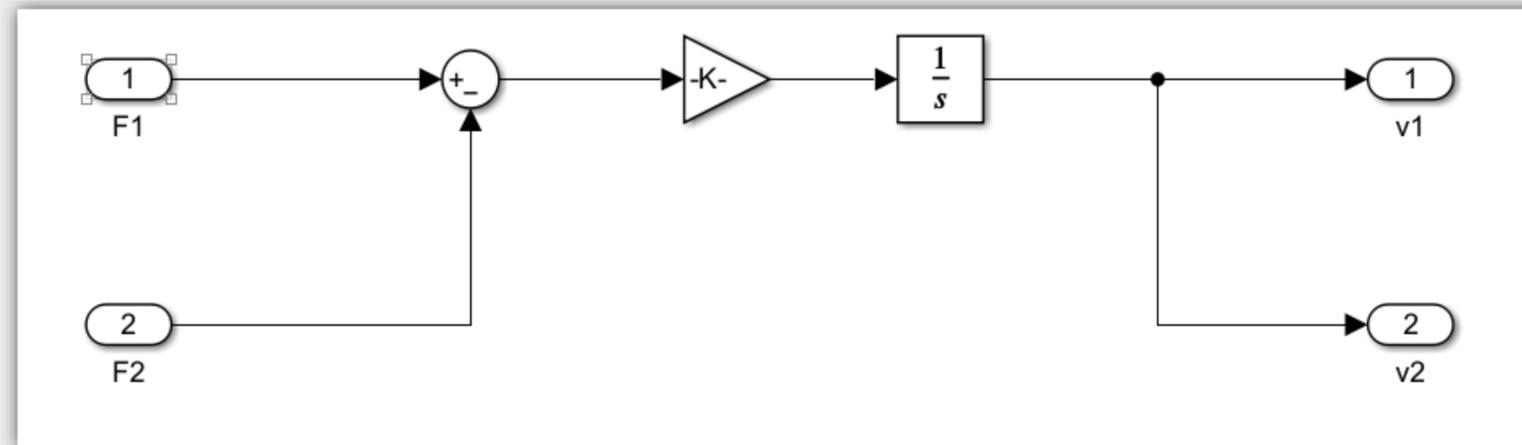
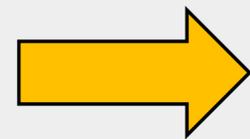
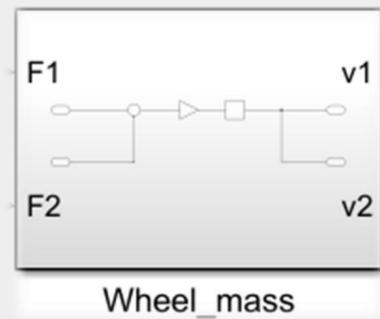
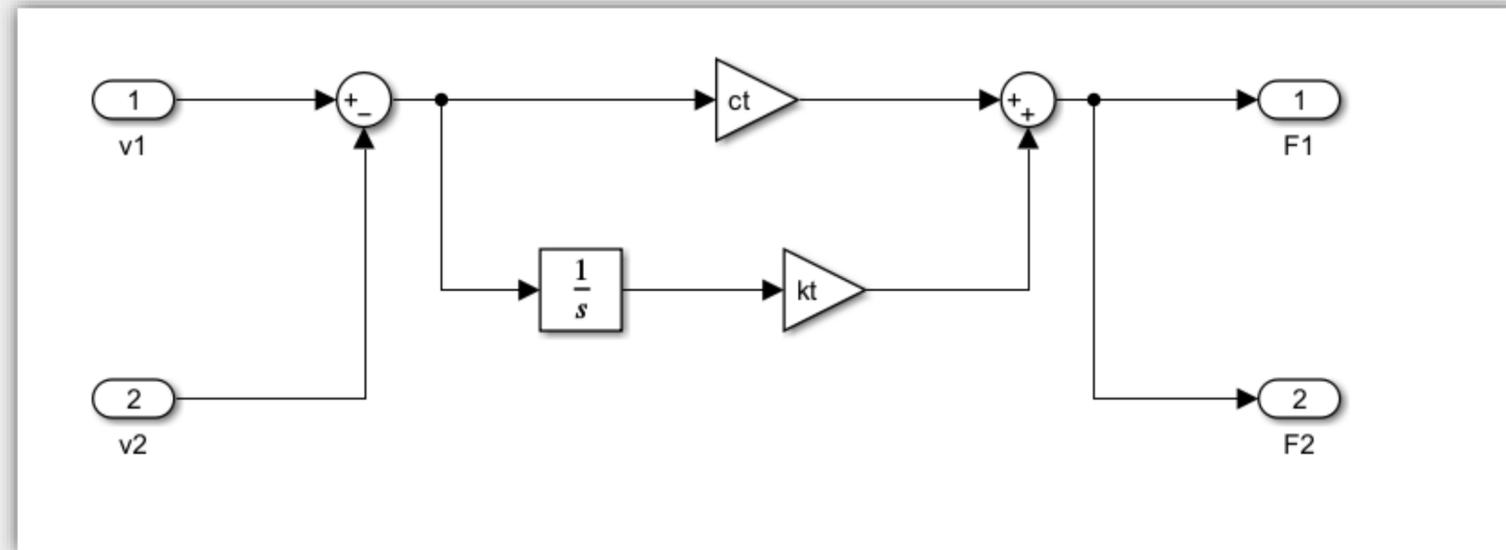
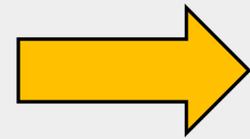
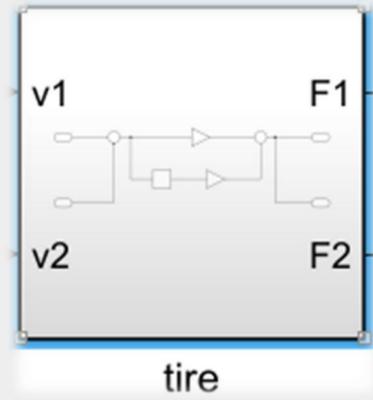
$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_t(z_u - z_r) - c_t(\dot{z}_u - \dot{z}_r).$$

<비현가질량(m_s)에 대한 운동방정식>

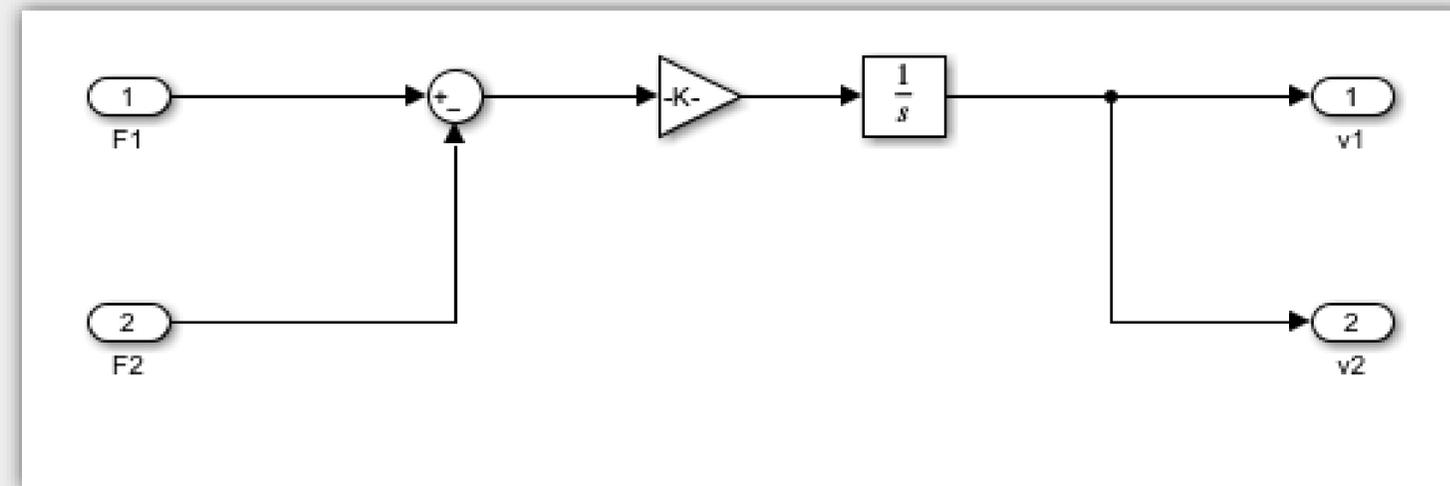
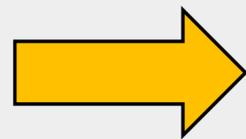
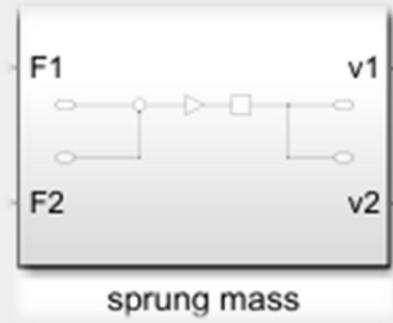
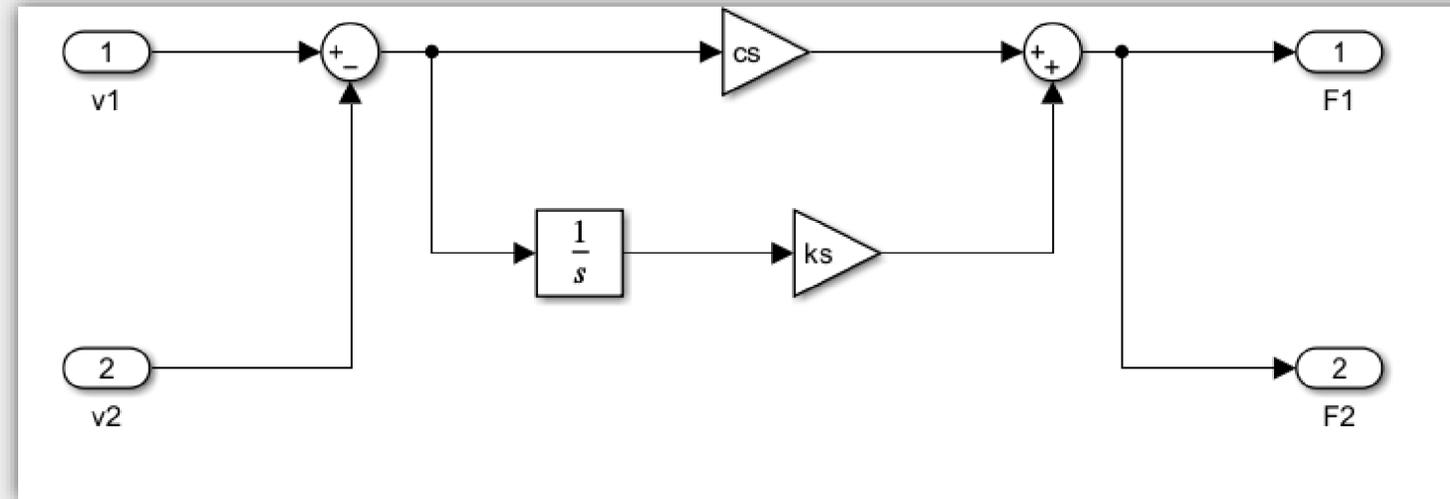
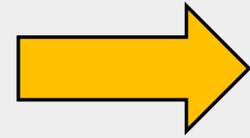
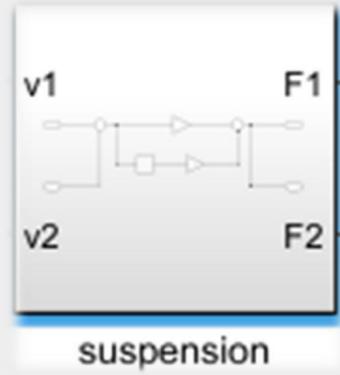
<SIMULINK 모델링>

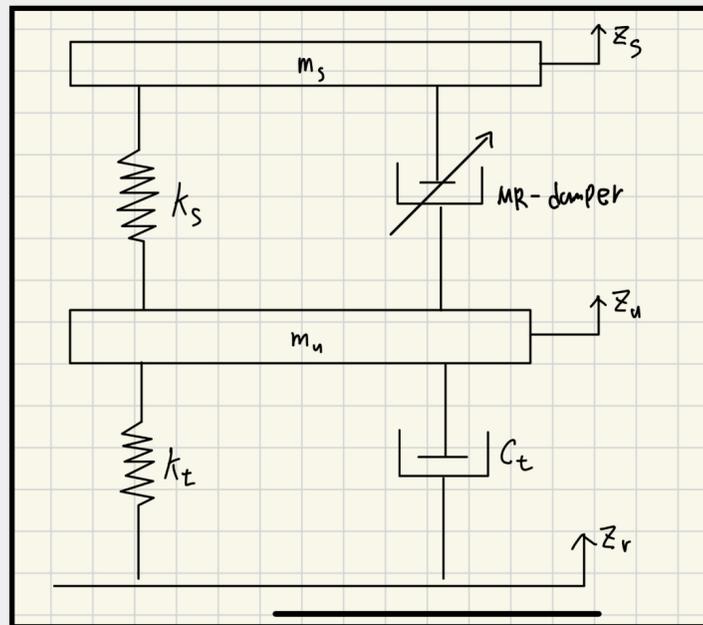


<SIMULINK 모델링>



<SIMULINK 모델링>





<Equation of motion>

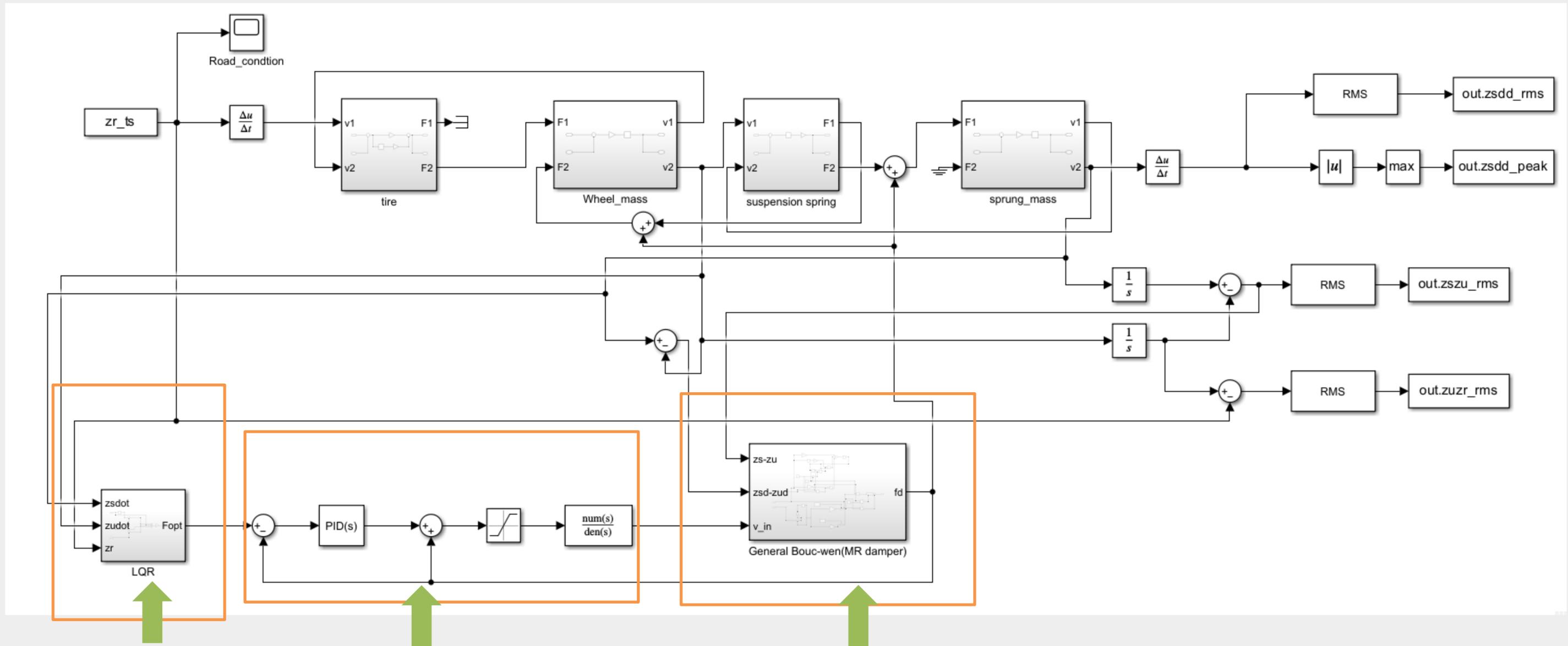
$$m_s \ddot{z}_s = - [k_s(z_s - z_u) + f_{MR}]$$

<현가질량(ms)에 대한 운동방정식>

$$m_u \ddot{z}_u = - [k_s(z_s - z_u) + f_{MR}] + [k_t(z_u - z_r) + c_t(\dot{z}_u - \dot{z}_r)]$$

<비현가질량(ms)에 대한 운동방정식>

<SIMULINK 모델링>



<LQR 제어기>

-MATLAB에서 계산한 K행렬로 최적 힘 출력

<PID 제어기>

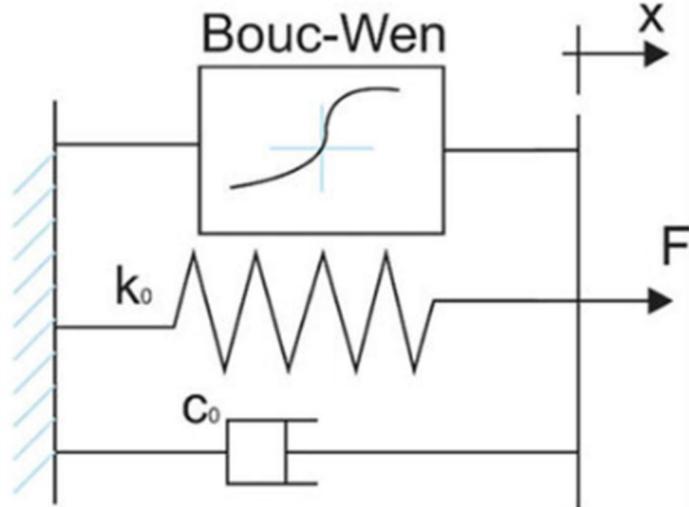
-LQR에서 뽑은 최적 힘과 실제 출력힘과의 오차를 제어하여 v_IN을 뽑아내는 ACTUATOR

16<General bouc-wen model>

-PID 에서 받은 전압을 실제 힘으로 출력



[히스테리시스 변수 z 계산하는 부분]



<general bouc-wen model>

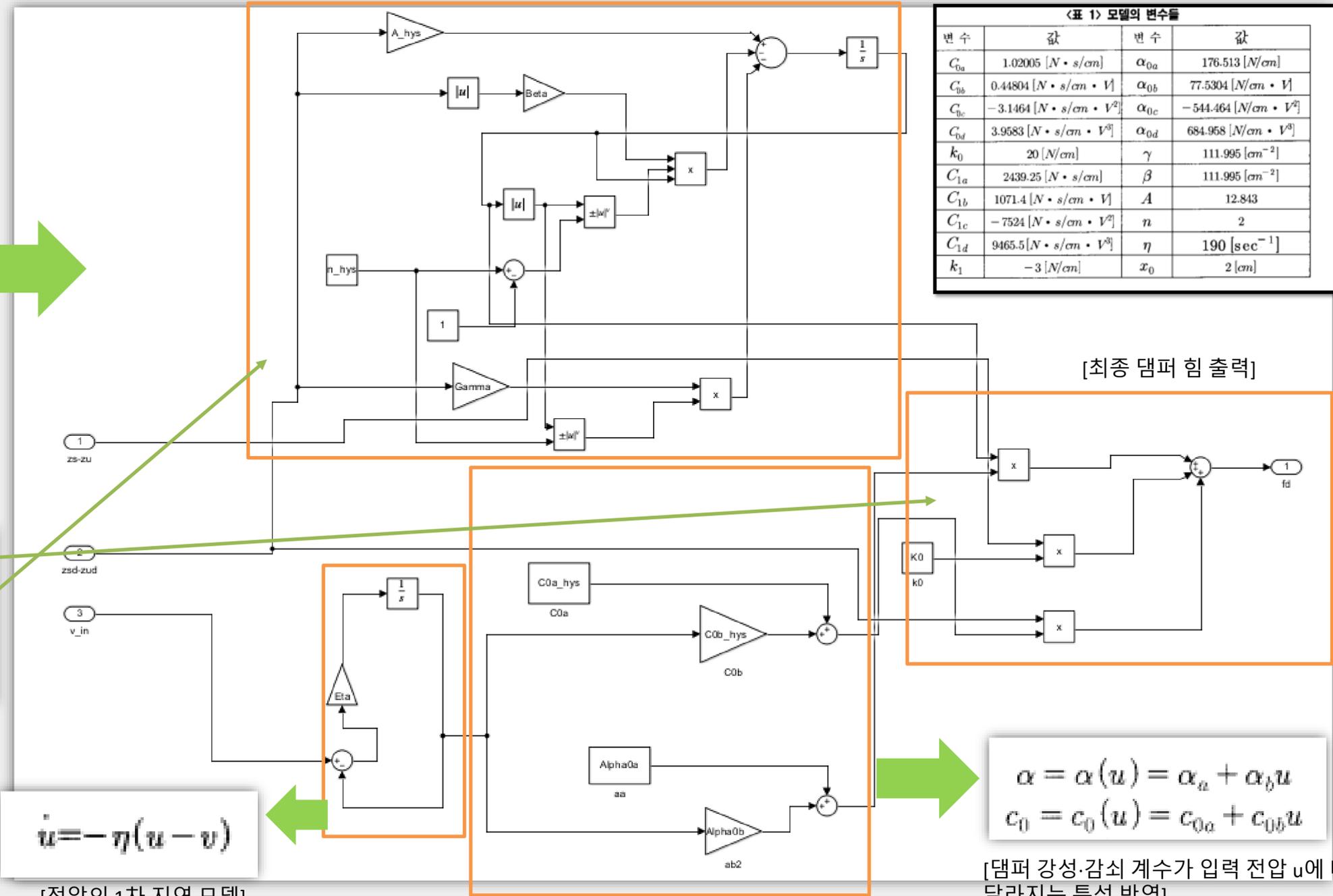
$$F = k_0x + c_0\dot{x} + az$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v)$$

[전압의 1차 지연 모델]

변수	값	변수	값
C_{0a}	1.02005 [N · s/cm]	α_{0a}	176.513 [N/cm]
C_{0b}	0.44804 [N · s/cm · V]	α_{0b}	77.5304 [N/cm · V]
C_{1c}	-3.1464 [N · s/cm · V ²]	α_{0c}	-544.464 [N/cm · V ²]
C_{0d}	3.9583 [N · s/cm · V ³]	α_{0d}	684.958 [N/cm · V ³]
k_0	20 [N/cm]	γ	111.995 [cm ⁻²]
C_{1a}	2439.25 [N · s/cm]	β	111.995 [cm ⁻²]
C_{1b}	1071.4 [N · s/cm · V]	A	12.843
C_{1c}	-7524 [N · s/cm · V ²]	n	2
C_{1d}	9465.5 [N · s/cm · V ³]	η	190 [sec ⁻¹]
k_1	-3 [N/cm]	x_0	2 [cm]

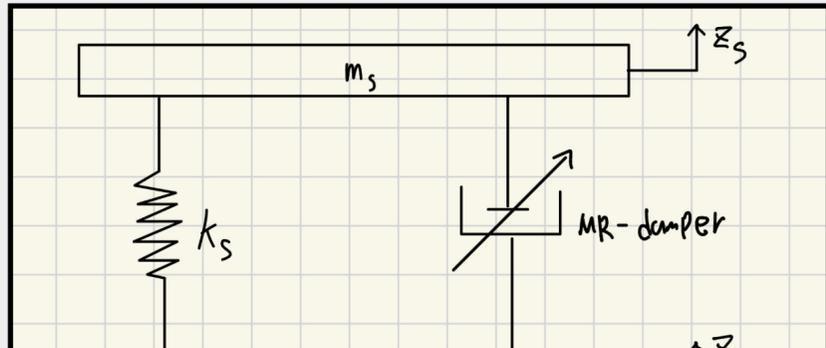


[최종 댐퍼 힘 출력]

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u$$

[댐퍼 강성·감쇠 계수가 입력 전압 u에 따라 달라지는 특성 반영]

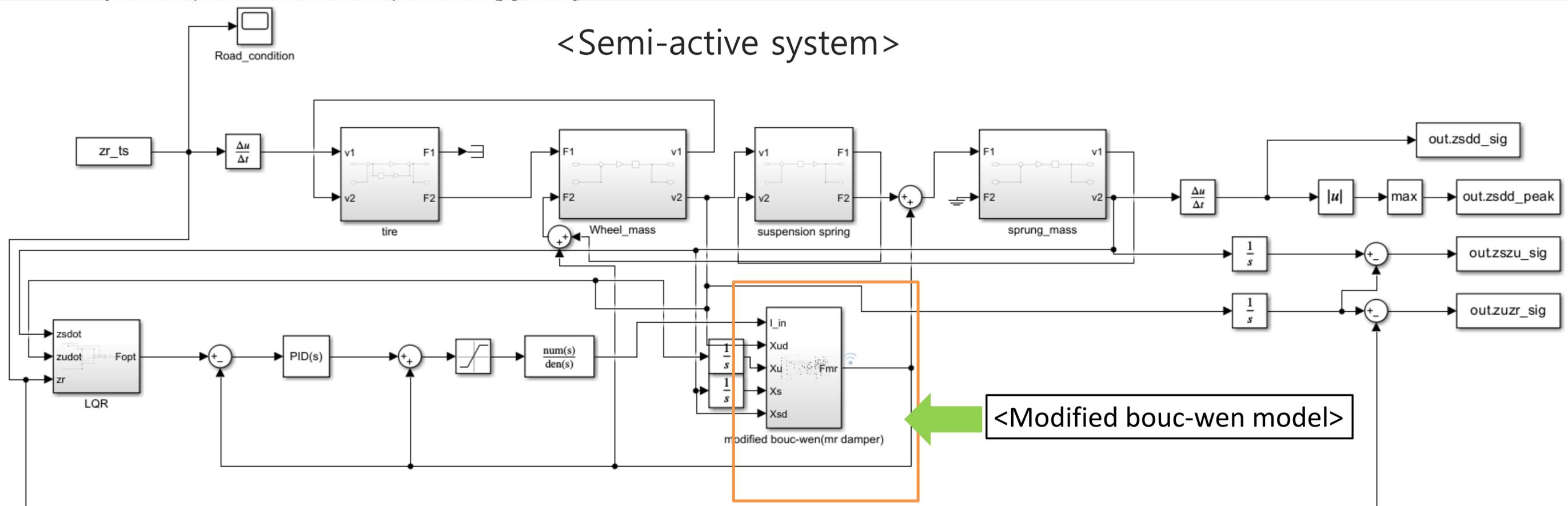


<Equation of motion>

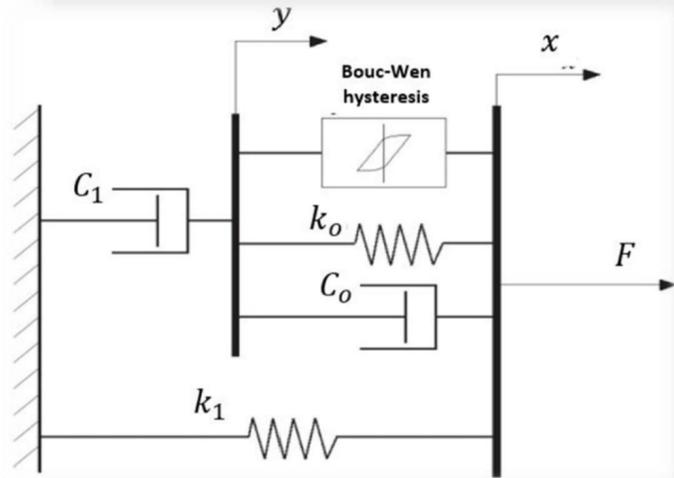
$$m_s \ddot{z}_s = - [k_s(z_s - z_u) + f_{MR}]$$

<현가질량(ms)에 대한 운동방정식>

<Semi-active system>



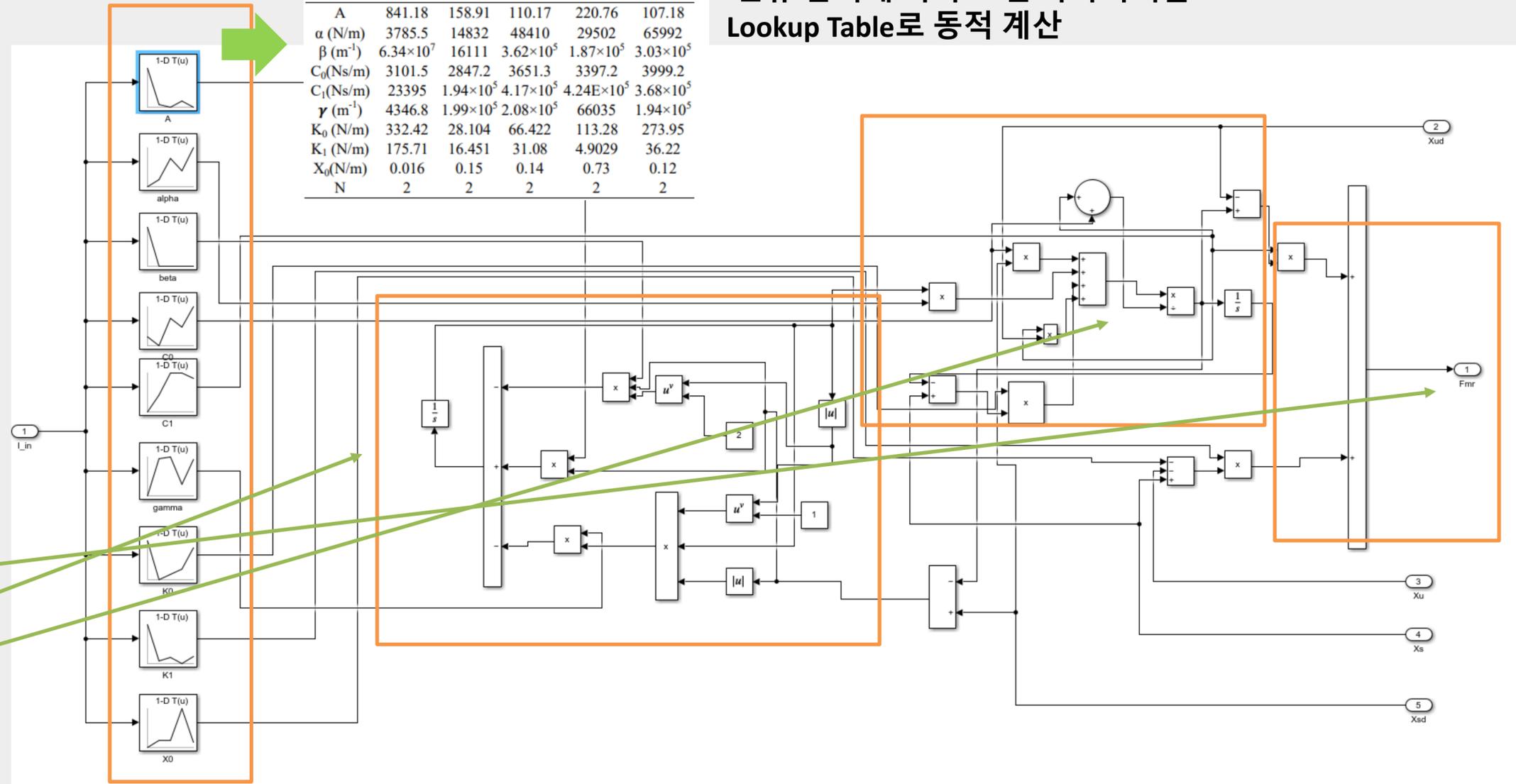
<Modified bouc-wen model>



<modified bouc-wen model>

Parameters	0A	0.25A	0.5A	0.75A	1A
A	841.18	158.91	110.17	220.76	107.18
α (N/m)	3785.5	14832	48410	29502	65992
β (m ⁻¹)	6.34×10 ⁷	16111	3.62×10 ⁵	1.87×10 ⁵	3.03×10 ⁵
C ₀ (Ns/m)	3101.5	2847.2	3651.3	3397.2	3999.2
C ₁ (Ns/m)	23395	1.94×10 ⁵	4.17×10 ⁵	4.24E×10 ⁵	3.68×10 ⁵
γ (m ⁻¹)	4346.8	1.99×10 ⁵	2.08×10 ⁵	66035	1.94×10 ⁵
K ₀ (N/m)	332.42	28.104	66.422	113.28	273.95
K ₁ (N/m)	175.71	16.451	31.08	4.9029	36.22
X ₀ (N/m)	0.016	0.15	0.14	0.73	0.12
N	2	2	2	2	2

전류 입력에 따라 모델 파라미터를 Lookup Table로 동적 계산



$$f_{MR} = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y})$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0+c_1} \{ \alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y) \}$$

LQR 제어기?

- LQR은 선형 시스템에서 이차형 비용함수(quadratic performance measure)를 최소화하여 가장 효율적인 상태 피드백 제어기를 설계하는 방법
- 따라서 최적제어(optimal control)의 대표적인 기법

Linear

: 시스템 모델이 선형이기 때문

Quadratic

: 비용함수 J 가 상태·입력의 제곱 형태(2차식)이기 때문에 계산이 단순해지고 해석적으로 해를 구할 수 있음

Regulator

: 제어를 통해 불필요한 움직임(오차, 진동 등)을 억제하고 상태를 원하는 점으로 수렴시키는 역할

LQR 제어기 목표

- 비용함수 J 를 최소화 하는 제어입력 u 찾기

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt$$

<LQR 비용함수>

$$u(t) = -Kx(t)$$

<제어 입력 $u(t)$ >

- Q: 상태 변수를 억제하는 강도 (승차감 / 진동 억제 중요도)
- R: 제어입력을 억제하는 강도 (힘/전류/에너지 절약 중요도)

- K는 제어 이득 행렬로 '리카티 방정식' 을 풀어 구할 수 있음
- 본 프로젝트에서는 $u(t)$ 는 MR댐퍼 목표 힘을 의미



LQR 최적 제어 입력 u^* 유도 과정 (Bellman \rightarrow Riccati)

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

1) 최적 비용 함수 $V(x)$ 도입

$$V(x) = x^T P x \Rightarrow \text{앞으로 들 최소 비용}$$

2) Bellman 최적성 조건 적용

$$\dot{V} + x^T Q x + u^T R u = 0$$

"현재 비용 + 미래 비용의 변화량 = 0" 이라는
최적제어 기본 조건

$$\dot{V} = x^T (A^T P + P A) x + 2x^T P B u$$

Proof) $V = (x^T P) x$

$$\dot{V} = \frac{d}{dt} (x^T P) \cdot x + (x^T P) \cdot \dot{x}$$

↓ P는 상수

$$= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$$

$$\dot{x} = A x + B u \text{ 대입}$$

$$\Rightarrow (A x + B u)^T P x + x^T P (A x + B u)$$

$$= x^T A^T P x + u^T B^T P x + x^T P A x + x^T P B u$$

$$u = u^T, x = x^T \text{ (스칼라이므로)}$$

$$= \underline{x^T (A^T P + P A) x + 2x^T P B u}$$



LQR 최적 제어 입력 u^* 유도 과정 (Bellman \rightarrow Riccati)

$$= \underline{x^T (A^T P + PA)x + 2x^T P B u}$$

↓ 최적성 조건 식에 대입.
(Bellman)

$$J(u) = x^T (A^T P + PA)x + 2x^T P B u + x^T Q x + u^T R u = 0$$

우식을 최소화하는 u 를 u^* 라고 하면 u 관련된 항에 대해서만 최소화하면 됨.

즉 $\phi(u) = u^T R u + 2x^T P B u$ ← 이부분만 u 에 대해 최소화

$\phi(u)$ 를 u 에 대해 미분하면

$$\frac{\partial \phi}{\partial u} = 2R u + 2B^T P x = 0$$

$$R u + B^T P x = 0$$

첫번째항 : $\frac{\partial}{\partial u} (u^T R u) = 2R u$

두번째항 : $\frac{\partial}{\partial u} (2x^T P B u) = 2B^T P x$

$\therefore u^* = -R^{-1} B^T P x$
 $K = R^{-1} B^T P$

“Bellman 최적성 조건을 만족시키기 위해, u 에 대한 항만 모아 미분하여 최소값을 찾으면 최적 제어입력 $u^* = -R^{-1} B^T P x$ 가 도출된다.”

$u^* = -R^{-1} B^T P x$ 를 다시 Bellman 식에 대입.

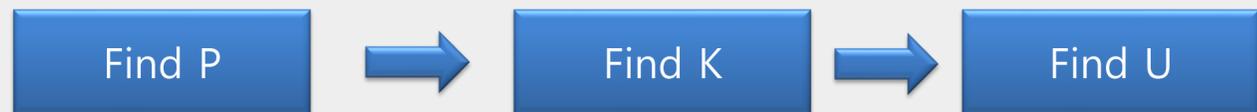
$$\Rightarrow x^T (A^T P + PA)x - x^T P B R^{-1} B^T P x + x^T Q x = 0$$

이식이 모든 x 에 대해 항상 0 이어야 한다.

$$\underline{A^T P + PA - P B R^{-1} B^T P + Q = 0}$$

“리카티 방정식”

“최적입력 u^* 을 다시 bellman식에 대입해 x 에 대한 항만 남기면 P 가 만족해야 하는 행렬 방정식, 즉 Riccati 방정식이 나온다.”



<LQR 제어기 흐름>

MATLAB에서의 LQR

```
>> help lqr
lqr - 선형-2차 조절기(LQR) 설계
최적 이득 행렬 K, 관련된 대수 리카티 방정식의 해 S, 연속시간 또는 이산시간 상태공간
모델 sys의 페루프 극점 P를 계산합니다.

Syntax
[K,S,P] = lqr(sys,Q,R,N)
[K,S,P] = lqr(A,B,Q,R,N)

Input Arguments
sys - 동적 시스템 모델
    ss 모델 객체
A - 상태 행렬
    n*n 행렬
B - 입력-상태 행렬
    n*m 행렬
Q - 상태-비용 가중 행렬
    행렬
R - 입력-비용 가중 행렬
    스칼라 | 행렬
N - 교차 항 행렬 (선택 사항)
    0 (default) | 행렬

Output Arguments
K - 최적 이득
    행 벡터
S - 관련된 대수 리카티 방정식의 해
    행렬
P - 페루프 시스템의 극점
    행 벡터
```

```
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
%% ===== LQR 이득 K 계산 =====
% LQR: J = ∫ (x'Qx + u'Ru) dt 최소
% 제어법칙: u = -K_lqr * x
[K_lqr, S_lqr, eig_cl] = lqr(A, B, Q, R);
disp('===== LQR 이득 K (u = -K_lqr * x) =====');
disp(K_lqr);
disp('===== 페루프 고유값 (A-BK) =====');
disp(eig_cl);
```

MATLAB 에서 내장 함수 lqr을 통해
A,B,Q,R 행렬 만 입력하면 앞서
설명한 이론에 근거한 리카티
방정식을 풀어서 해를 도출해줌

MATLAB에서 LQR 구현 과정

① 상태 공간 모델 구성

① 상태공간 구성

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) + u$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) - c_t(\dot{z}_u - \dot{z}_r) - u$$

입력 u : 조절가능한 힘

상태변수

$$x_1 = z_s - z_u \rightarrow \text{차체변위}$$

$$x_2 = \dot{z}_s \rightarrow \text{차체속도}$$

$$x_3 = z_u - z_r \rightarrow \text{바퀴변위}$$

$$x_4 = \dot{z}_u \rightarrow \text{바퀴속도}$$

$$\omega = \dot{z}_r \quad (\omega \text{는 외란})$$

상태방정식으로 정리

$$\dot{X} = AX + BU + E\omega$$

$$\dot{x}_1 = \dot{z}_s - \dot{z}_u = x_2 - x_4$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{z}_s = -\frac{k_s}{m_s}x_1 + \frac{1}{m_s}u$$

$$\dot{x}_3 = \dot{z}_u - \dot{z}_r = x_4 - \omega$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{z}_u = \frac{k_s}{m_u}x_1 - \frac{k_t}{m_u}x_3 - \frac{c_t}{m_u}x_4 + \frac{c_t}{m_u}\omega - \frac{1}{m_u}u$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & 0 & -\frac{k_t}{m_u} & -\frac{c_t}{m_u} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_s \\ 0 \\ -1/m_u \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ c_t/m_u \end{bmatrix}$$

```

8
9 clear; clc;
10
11 %% ===== 차량 파라미터 (Quarter-car, SI 단위) =====
12 % Masses
13 ms = 450; % Sprung mass (kg)
14 mu = 45; % Unsprung mass (kg)
15
16 % Suspension (N/cm -> N/m)
17 ks = 300 * 100; % Suspension stiffness = 300 N/cm = 30000 N/m
18 kt = 2000 * 100; % Tire stiffness = 2000 N/cm = 200000 N/m
19
20 % Damping (Ns/cm -> Ns/m)
21 cs = 7.5 * 100; % Suspension damping = 7.5 Ns/cm = 750 Ns/m
22 ct = 1.25 * 100; % Tire damping = 1.25 Ns/cm = 125 Ns/m
23
24
25 %% =====
26 % MR DAMPER PARAMETERS
27 %% =====
    
```

<차량 파라미터 정의>

```

39 %% ===== 3. Quarter-car State-space =====
40 % x = [x1; x2; x3; x4]
41 % x1 = zs - zu
42 % x2 = zsd
43 % x3 = zu - zr
44 % x4 = zud
45
46 A = [ 0      1      0      -1;
47      -ks/ms  0      0      0;
48      0      0      0      1;
49      ks/mu  0      -kt/mu -ct/mu ];
50
51 B = [0; 1/ms; 0; -1/mu];
52
53 E = [0; 0; -1; ct/mu];
54
55 % z_sdd = Cz*x + Dz*u
56 Cz = [-ks/ms 0 0 0];
57 Dz = 1/ms;
58
59 %% ===== 4. Output-based LQR Settings =====
    
```

<상태공간 방정식 행렬 정의>



② 출력 기반 LQR 설정 및 weight 후보 정의

<출력기반 LQR>

$$y = \begin{bmatrix} z_{sdd} \\ x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{차체 가속도} \\ \text{서스펜션 스트로크} \\ \text{타이어 변위} \end{bmatrix}$$

중요하게 생각되는 출력들을 비용 함수에 직접 반영하기 위해 출력 y를 구성하는 준비 단계

```

59 %% ===== 4. Output-based LQR Settings =====
60 % y = [ z_sdd ; x1 ; x3 ]
61 C = [Cz;
62       1 0 0 0;
63       0 0 1 0];
64
65 D = [Dz; 0; 0];
66
67 %% Weight candidate lists
68 w_acc_list = 1e6*[0.5 1 2 5];
69 w_susp_list = 1e6*[0.5 1 2];
70 w_tire_list = 1e5*[0.2 0.5 1];
71 r_u_list   = 1e-3*[0.5 1 2];
72
73 %% Normalization ref values
74 x1_ref = 0.15;
75 x3_ref = 0.05;
76 zsdd_ref = 3.0;
77 u_ref = 2000;
78
79 %% Performance metric weights
80 W_zsdd_peak = 1; W_zsdd_rms = 4;
81 W_x1_peak   = 2; W_x1_rms   = 4;
82 W_x3_peak   = 1; W_x3_rms   = 2;
83 W_u_rms     = 0.3;
84
    
```

각 출력에 부여할 가중치 후보들을 미리 여러 값으로 준비해둔 리스트

각 성능지표를 공정하게 비교하기 위해 기준 크기를 정해놓은 값

Peak·RMS 등 성능지표들 간의 중요도를 설정하기 위한 가중치



③ 최적의 K 계산

```

104 %% ===== 6. Optimal Weight Search =====
105 best_J = inf;
106
107 for wa = w_acc_list
108     for ws = w_susp_list
109         for wt = w_tire_list
110             for ru = r_u_list
111
112                 Qy = diag([wa, ws, wt]);
113                 R = ru;
114
115                 % Output LQR → State LQR
116                 Q_new = C'*Qy*C;
117                 N_new = C'*Qy*D;
118                 R_new = R + D'*Qy*D;
119
120                 % Compute LQR gain
121                 [K,~,eig_cl] = lqr(A,B,Q_new,R_new,N_new);
122                 if any(real(eig_cl)>=0), continue; end
123
124                 % Simulate state response
125                 A_cl = A - B*K;
126                 sys_x = ss(A_cl, E, eye(4), zeros(4,1));
127                 x_all = lsim(sys_x, zrd, t);
128
129                 x1 = x_all(:,1);
130                 x3 = x_all(:,3);
131                 u = -(K*x_all.').';
132
133                 z_sdd = (Cz*x_all.').' + Dz*u;
134
135                 % Peak/RMS
136                 peak_x1 = max(abs(x1)); rms_x1 = sqrt(mean(x1.^2));
137                 peak_x3 = max(abs(x3)); rms_x3 = sqrt(mean(x3.^2));
138                 peak_z = max(abs(z_sdd)); rms_z = sqrt(mean(z_sdd.^2));
139                 rms_u = sqrt(mean(u.^2));
140
141                 % Normalize
142                 J = W_zsdd_peak*(peak_z/zsdd_ref) + W_zsdd_rms*(rms_z/zsdd_ref) + ...
143                   W_x1_peak*(peak_x1/x1_ref) + W_x1_rms*(rms_x1/x1_ref) + ...
144                   W_x3_peak*(peak_x3/x3_ref) + W_x3_rms*(rms_x3/x3_ref) + ...
145                   W_u_rms*(rms_u/u_ref);
146
147                 if J < best_J
148                     best_J = J;
149                     best_K = K;
150                     best_param = [wa ws wt ru];
151                     best_eig = eig_cl;
152                 end
153             end
154         end
155     end
156 end
    
```

여러 개의 출력 가중치 조합에 대해 LQR 제어를 반복 설계하고, 각 조합의 승차감·서스펜션·타이어·제어힘 성능지표 J를 계산해 J가 최소가 되는 최적 LQR 이득 K를 자동으로 선택하는 코드

- ① 출력 가중치 후보(Qy, R) 설정
- ↓
- ② 각 가중치 조합(w_acc, w_susp, w_tire, r_u)에 대해 LQR 설계 반복
- ↓
- ③ Output LQR → State LQR 변환(Q_new, R_new, N_new 계산)
- ↓
- ④ lqr(A, B, Q_new, R_new, N_new)로 K 계산
- ↓
- ⑤ 계산된 K로 페루프 시스템 시뮬레이션(lsim)
- ↓
- ⑥ 가속도·스트로크·타이어 변위·제어힘의 Peak/RMS 계산
- ↓
- ⑦ 성능지표 J 계산(정규화 + 가중합)
- ↓
- ⑧ J가 최소가 되는 최적 K(best_K) 선택

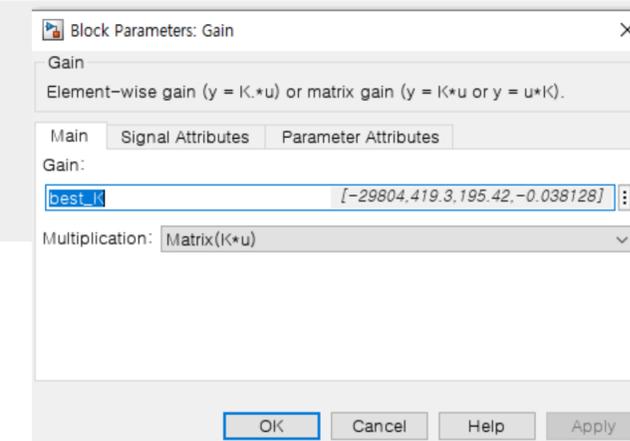
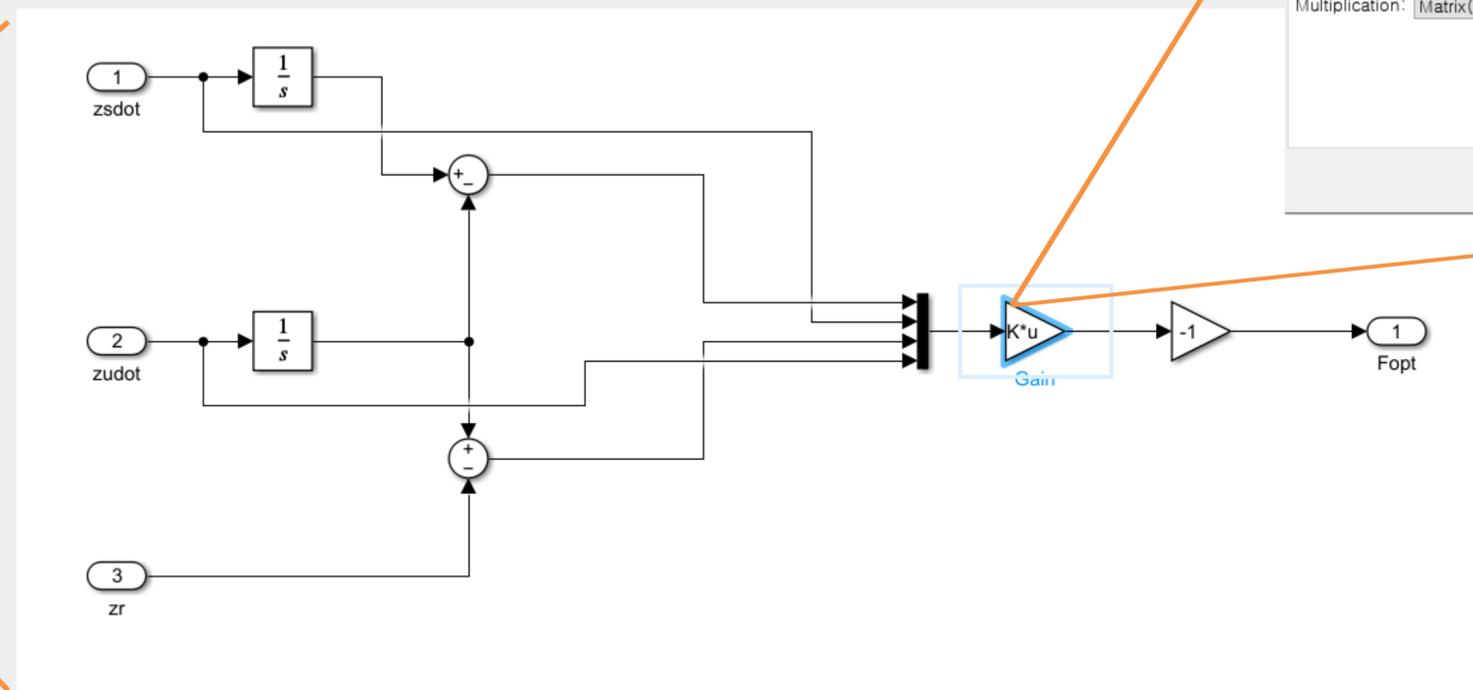
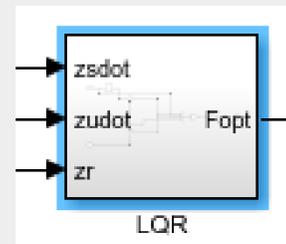
best_K

[-2.9804e+04,419.3...

<workspace 저장 결과>

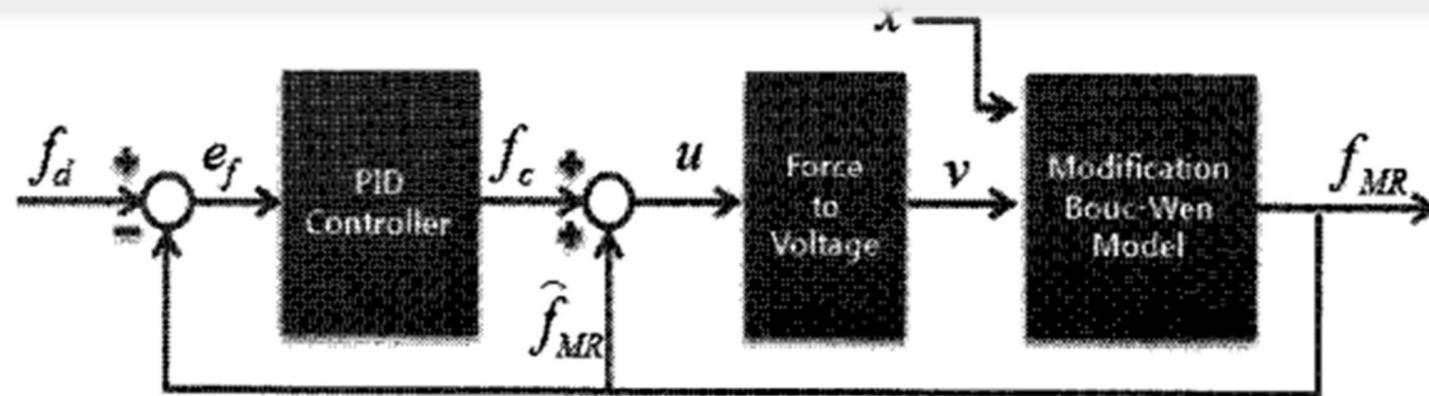
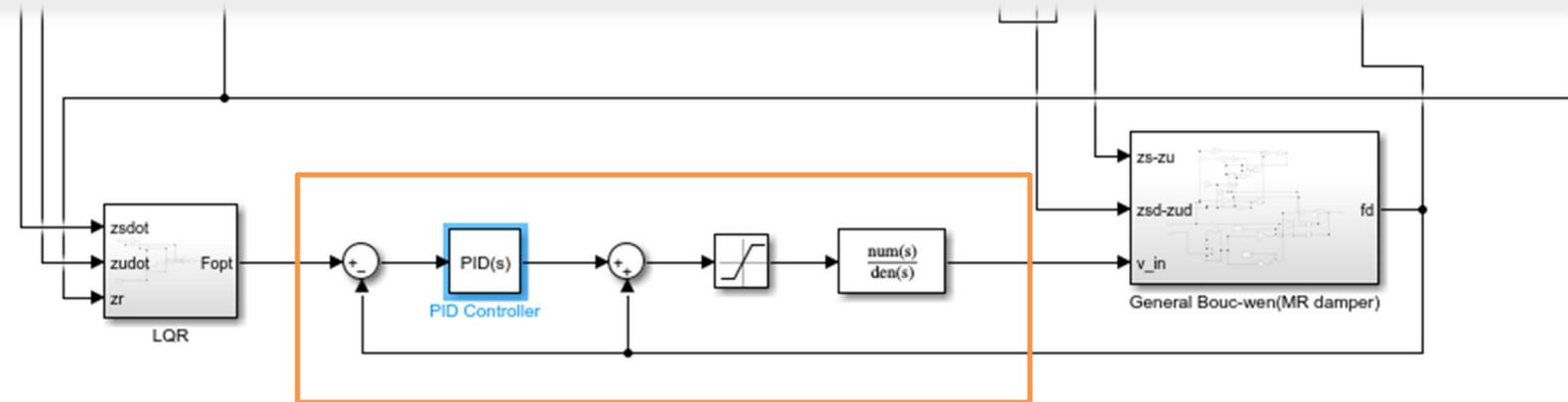
Command Window
-2.9804 0.0419 0.0195 -0.0000

④ SIMULINK에서 최적의 힘 계산



“MALAB에서 계산된 LQR 이득 K 를 이용해 Simulink에서 $u = -K*x$ 로 최적 제어힘 Fopt 를 계산한다.”

⑤ SIMULINK(PID control)



WHY PID?

- Bouc-Wen MR 댐퍼 모델은 비선형.히스테리시스가 강해서 역모델 기반 제어가 어려움
- 목표 힘을 그대로 전류로 환산하기 힘들어, 단순하고 직관적인 PID 제어 방식을 사용
- 시뮬레이션 응답을 보면서 경험적으로 K_p, K_i, K_d 를 조정하여 안정적인 전류 입력 확보



모델별 시뮬레이션 진행 방법

① Passive model

- passive_model.m 실행 -> passivemodel.slx실행 -> postproc_quartercar.m실행

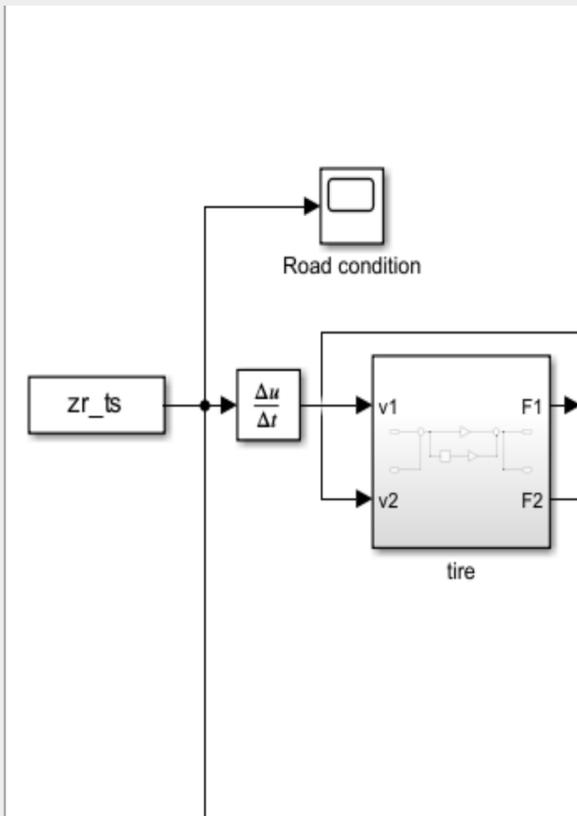
② general MR damper model

- general_MRdamper.m 실행 -> generalMRdamper.slx실행 -> postproc_quartercar.m실행

③ modified MR damper model

- modified_MRdamper.m 실행 -> modifiedMRdamper.slx실행 -> postproc_quartercar.m실행

* 시뮬레이션할 노면 입력은 각 모델별 m파일에서 주석해제 후 사용



<평가할 성능 지표>

1. ZSDD_RMS — 차체 가속도 RMS (Ride comfort)

-승차감 지표. 노면 충격이 차체로 얼마나 전달되는지를 나타내는 값. 작을수록 차량이 흔들림을 적게 느끼며 승차감이 향상됨.

2. ZSDD_peak — 차체 가속도 최대값 (Impact shock)

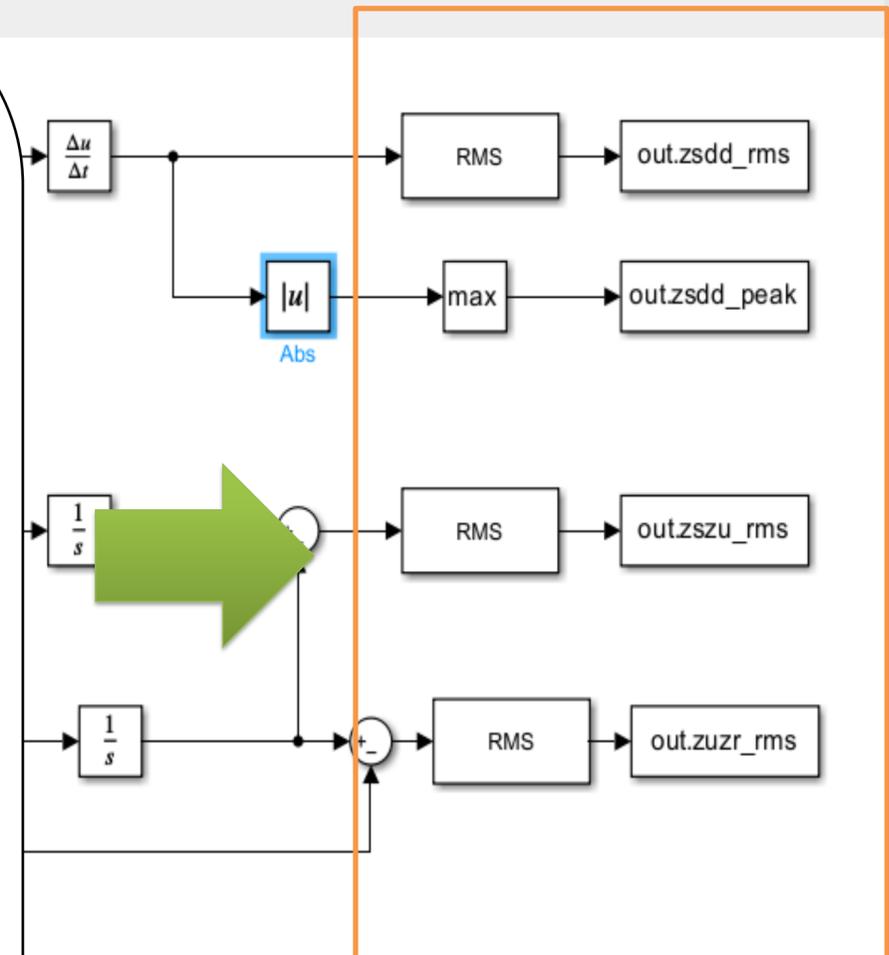
-순간 충격의 세기. 과속방지턱이나 요철을 지날 때 차체가 받는 최대 가속도(최대 충격)를 의미. 값이 작을수록 충격이 덜한 안전한 서스펜션.

3) ZS-ZU_RMS — 서스펜션 스트로크 RMS (Suspension working)

-서스펜션이 얼마나 많이 움직였는지를 나타냄. 값이 크면 스트로크가 크고, 서스펜션이 많이 압축/반발됨. 값이 작을수록 불필요한 큰 움직임이 줄어들어 안정적임.

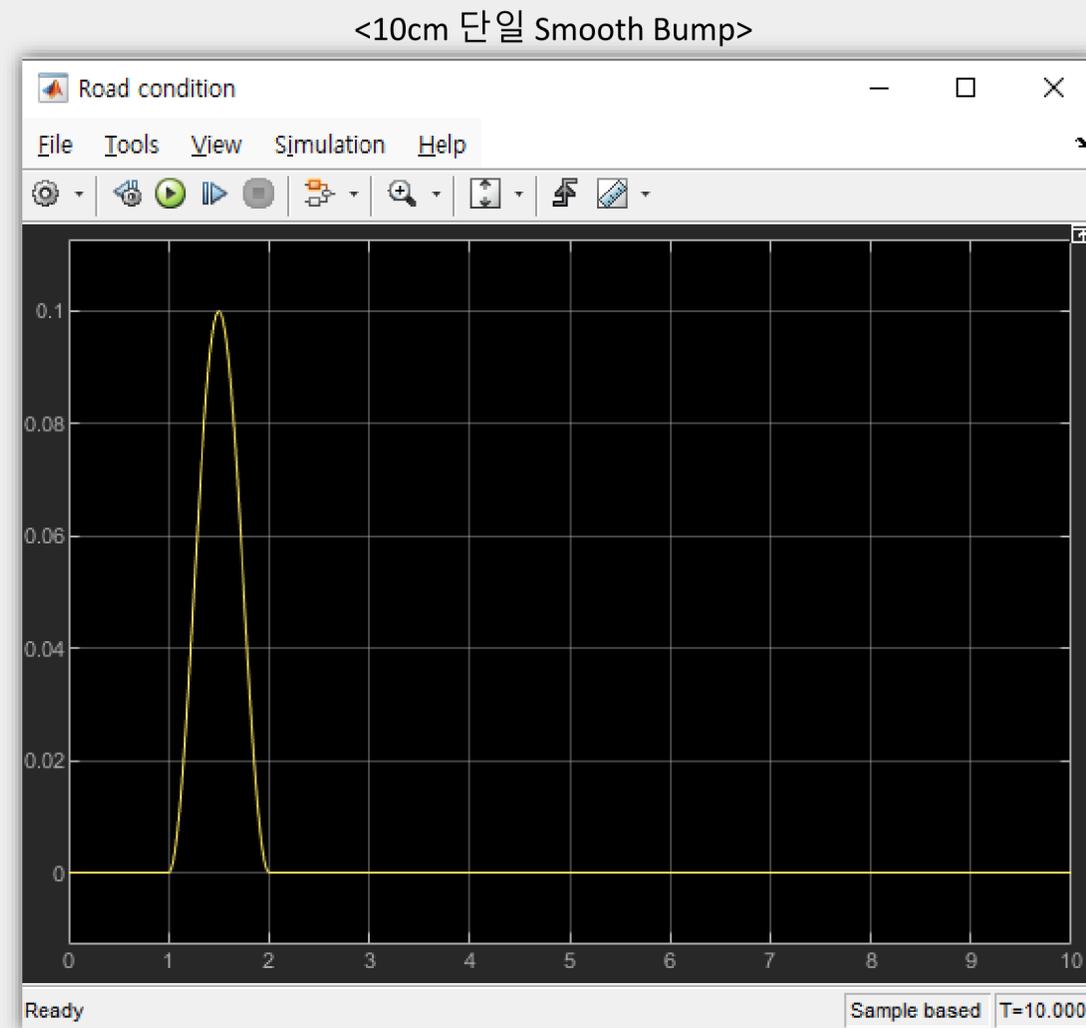
4) ZU-ZR_RMS — 타이어 변위 RMS (Tire load variation)

-타이어가 노면과 얼마나 안정적으로 접촉하는지를 나타냄. 값이 크면 타이어가 노면에서 많이 튀어오르거나 접지력이 흔들림. 값이 작을수록 접지력이 일정하게 유지되어 주행 안정성 향상.





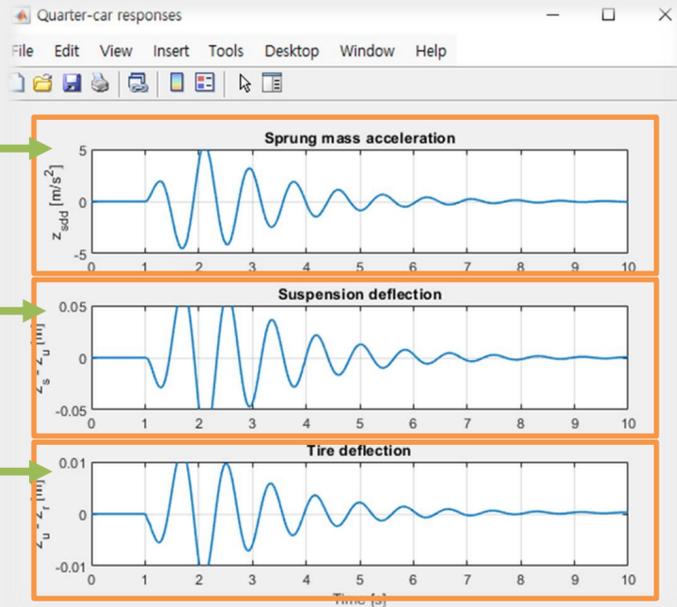
시뮬레이션 결과 - 노면 1



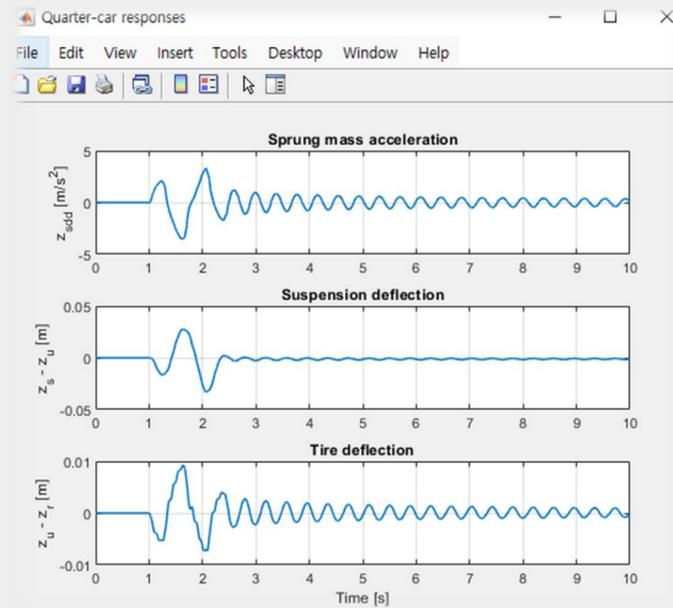
“방지턱 하나를 천천히 넘는 상황”

시뮬레이션 결과 - 노면 1

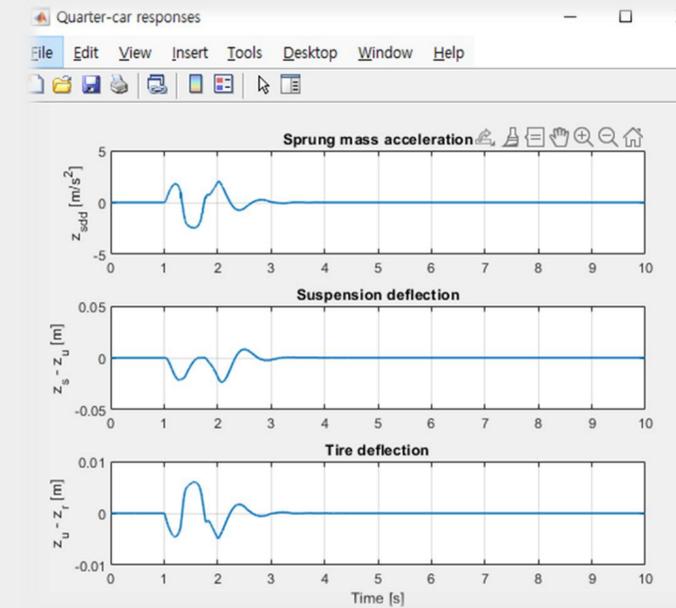
① Passive model



② general MR damper model



③ modified MR damper model



	RMS_zsdd	Peak_zsdd	RMS_zszu	RMS_zuzr
Passive	1.6564	5.438	0.024046	0.0040632
General BW	0.91344	3.5098	0.0081355	0.0022641
Modified BW	0.78102	2.4747	0.0067574	0.0019351

==== Performance reduction relative to Passive (%) ====

	RMS_zsdd_percent	Peak_zsdd_percent	RMS_zszu_percent	RMS_zuzr_percent
General BW	-44.854	-35.458	-66.167	-44.278
Modified BW	-52.848	-54.492	-71.898	-52.375

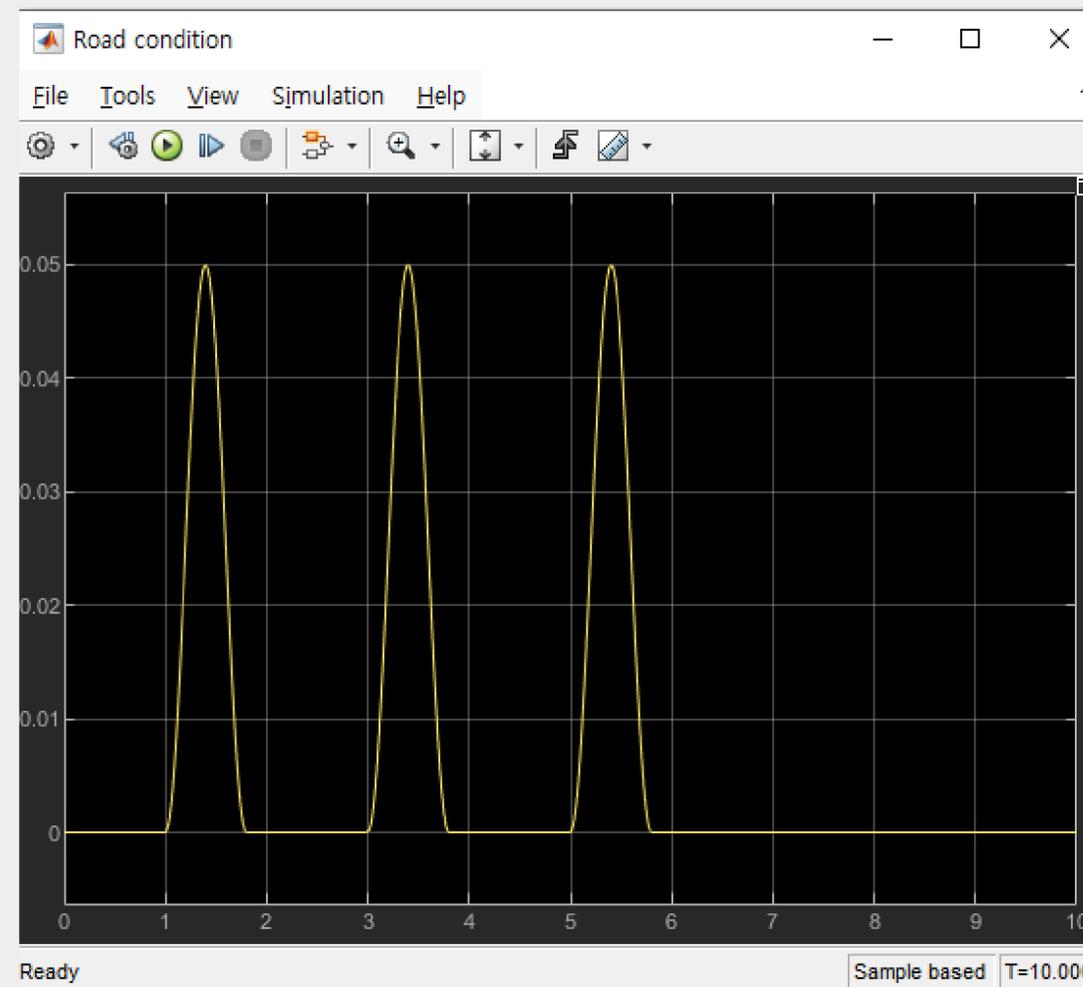
<쿼터카 모델 성능 비교 표>

<passive 모델에 대한 mr댐퍼 모델의 성능 지표 감소율>



시뮬레이션 결과 - 노면 2

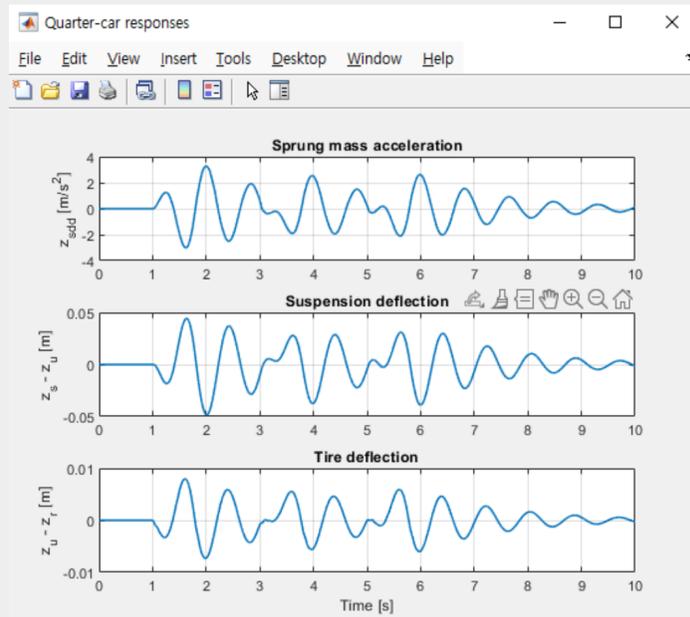
<5cm 다중 Smooth Bump>



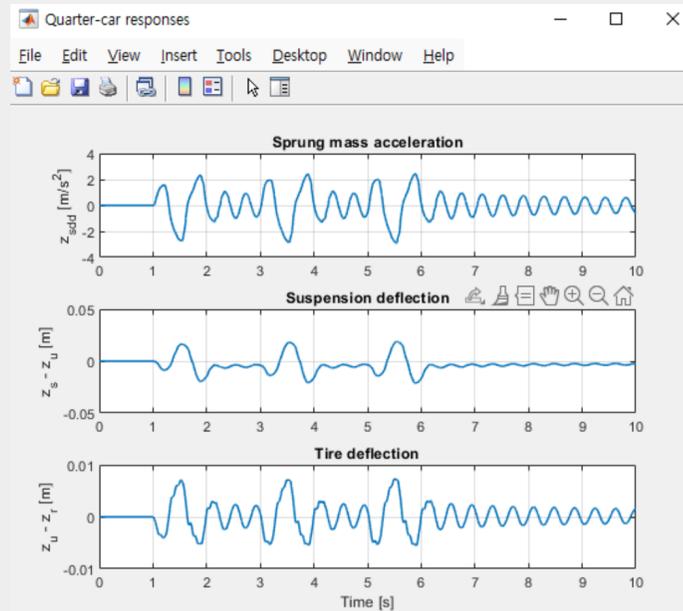
“연속적인 과속방지턱이 있는 도로”

시뮬레이션 결과 - 노면 2

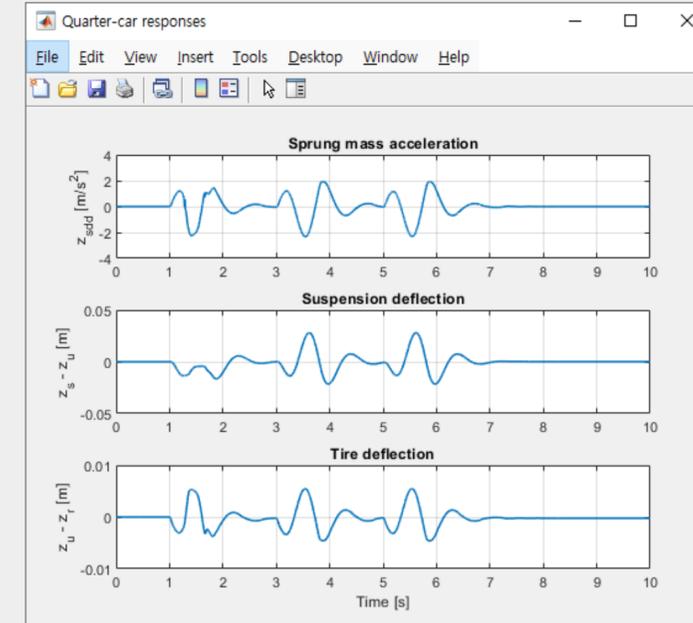
① Passive model



② general MR damper model



③ modified MR damper model



==== Quarter-car performance metrics (absolute values) ====

	RMS_zsdd	Peak_zsdd	RMS_zszu	RMS_zuzr
Passive	1.2557	3.2891	0.018357	0.0030984
General BW	1.0521	2.9061	0.008715	0.002611
Modified BW	0.91492	2.3282	0.010109	0.0022563

<쿼터카 모델 성능 비교 표>

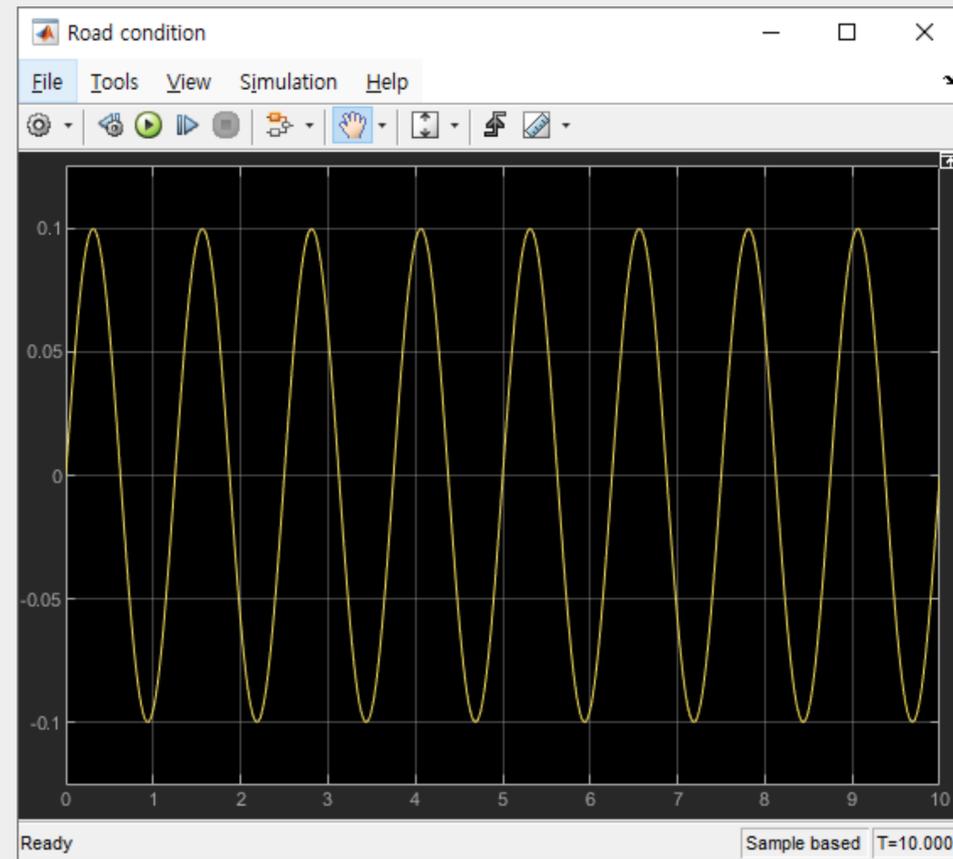
==== Performance change relative to Passive (%) ====

	RMS_zsdd_percent	Peak_zsdd_percent	RMS_zszu_percent	RMS_zuzr_percent
General BW	-16.214	-11.645	-52.525	-15.731
Modified BW	-27.139	-29.215	-44.931	-27.179

<passive 모델에 대한 mr댐퍼 모델의 성능 지표 감소율>

시뮬레이션 결과 - 노면 3

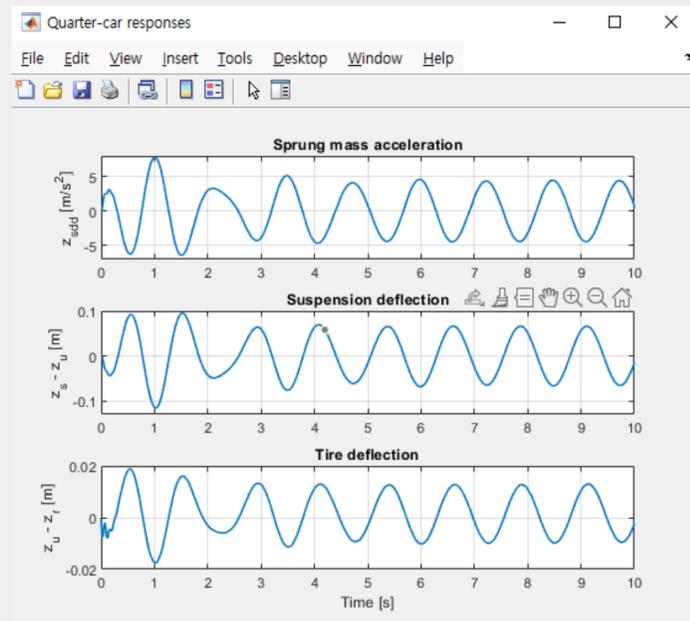
<사인파 노면>



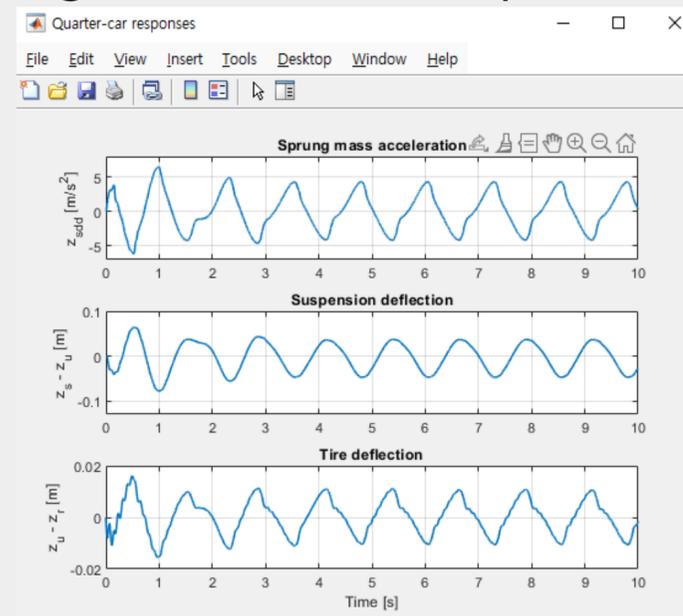
“반복적인 요철이 있는 도로”,

시뮬레이션 결과 - 노면 3

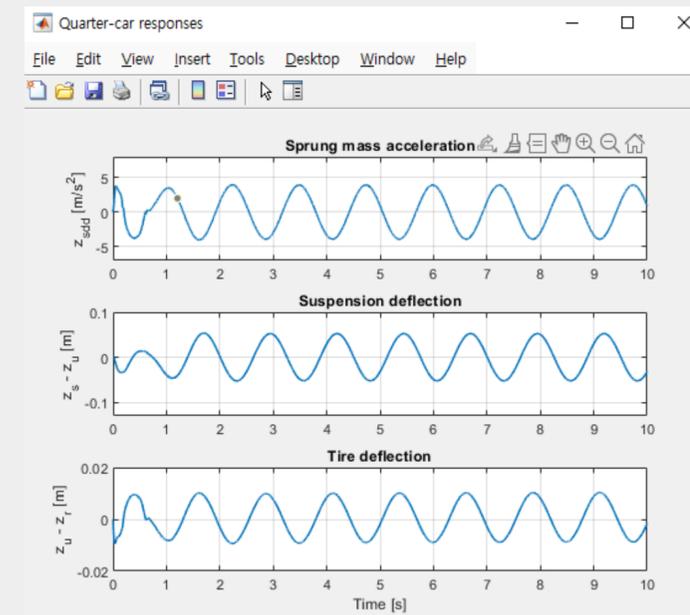
① Passive model



② general MR damper model



③ modified MR damper model



==== Quarter-car performance metrics (absolute values) ====

	RMS_zsdd	Peak_zsdd	RMS_zszu	RMS_zuzr
Passive	3.4599	7.8328	0.051284	0.0088706
General BW	2.9433	6.5172	0.034465	0.0072807
Modified BW	2.8089	4.031	0.036639	0.0068682

<쿼터카 모델 성능 비교 표>

==== Performance change relative to Passive (%) ====

	RMS_zsdd_percent	Peak_zsdd_percent	RMS_zszu_percent	RMS_zuzr_percent
General BW	-14.931	-16.796	-32.796	-17.923
Modified BW	-18.816	-48.537	-28.557	-22.573

<passive 모델에 대한 mr댐퍼 모델의 성능 지표 감소율>

결과 해석

- General/Modified MR 모델 모두 Passive 대비 성능 향상
- General 모델은 오실레이션이 잔존 -> 항복 전 후 거동을 명확히 표현하지 못한 한계
- Modified 모델은 항복전 후 강성 변화를 반영하여 더 정확한 거동 재현
- 다양한 노면 조건에서 가장 안정적인 성능을 확인함



COMSOL

<MR damper 해석 목적>

(1) Thermal Analysis

- Coil 전류에 의한 Joule Heating 평가
- Damper 내부 온도 분포 파악
- 열적 안정성 판단

$$B \uparrow \Rightarrow \tau_y(B) \uparrow \Rightarrow \Delta p(\tau_y) \uparrow \Rightarrow F(\Delta p) \uparrow$$

(2) Magnetic Analysis

- Magnetic Flux Density 계산
- 유동 해석과의 연결(자기장을 정확히 계산)
- COMSOL 5.2 version의 한계로 유의미한 결과 도출 실패



(3) Flow Analysis

- MR fluid의 점도에 따른 흐름 특성 확인
- Gap 내 Velocity field, 압력강하 분석
- 감쇠력 산출

<Datasheets & References Used for Modeling>

1. S. Sefidkar-Dezfouli, "Design, Simulation, and Fabrication of a Lightweight Magneto-Rheological Damper," M.Sc. Thesis, Simon Fraser University, 2014.
2. MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid Technical Data Sheet
3. RD-8040-1 and RD-8041-1 Dampers

Electrical Properties*

Input Current, Amp	
Continuous for 30 seconds	1 max
Intermittent	2 max
Input Voltage, Volt	12 DC
Resistance, ohms	
@ ambient temperature	5
@ 71°C (160°F)	7

Typical Properties*

	RD-8040-1
Stroke, mm (in)	55 (2.17)
Extended Length, mm (in)	208 (8.2)
Body Diameter, mm (in)	42.1 (1.66) max
Shaft Diameter, mm (in)	10 (0.39)
Tensile Strength, N (lbf)	8896 (2000) max
Damper Forces, N (lbf)	
Peak to Peak	
5 cm/sec @ 1 A	>2447 (>550)
20 cm/sec @ 0 A	<667 (<150)
Operating Temperature, °C (°F)	71 (160) max



Name	Expression	Value	Description
t_coil_slot	1.0[mm]	0.001 m	
t_MR_gap	1[mm]	0.001 m	
L_core	11.25[mm]	0.01125 m	core height
R_piston	18.25[mm]	0.01825 m	Outer radius of the piston
P_avg	1[W]	1 W	Average power dissipatio...
housing_i...	21.05[mm]	0.02105 m	
T_amb	293.15[K]	293.15 K	Ambient air temperature
h_conv	30[W/m^2/K]	30 W/(m^2·K)	Convective heat transfer...
W_coil	4.35[mm]	0.00435 m	Radial width of the coil...
D_body	42.1[mm]	0.0421 m	Outer diameter of the da...
L_coil	80[mm]	0.08 m	Axial length of the coil...
R_core	9.9[mm]	0.0099 m	Radius of the magnetic...
t_gap	9[mm]	0.009 m	Radial magnetic/flow ga...
Q0	P_avg / V_coil	21701 W/m³	Volumetric heat generati...
V_coil	pi*(r_co^2 - r_ci^2)*L...	4.6082E-5 m³	Volume of the coil regio...
r_co	r_ci+W_coil	0.02325 m	Outer radius of the coil r...
r_ci	R_core + t_gap	0.0189 m	Inner radius of the coil r...



Thermal Analysis

<MR damper Geometry setting>

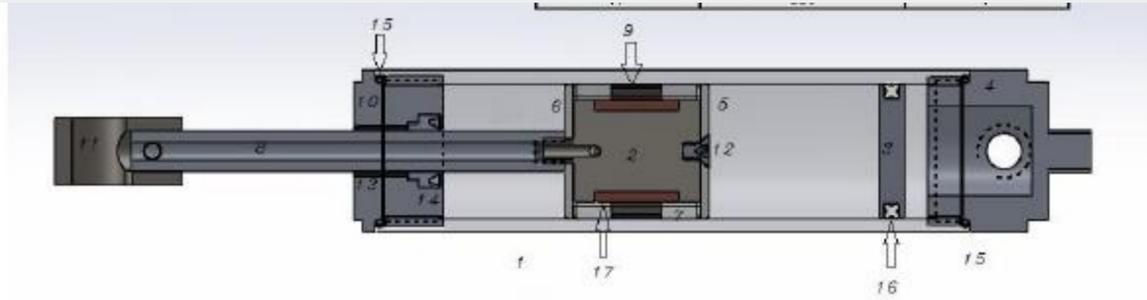


Figure 5.1 Detailed SolidWorks CAD design of proposed damper.

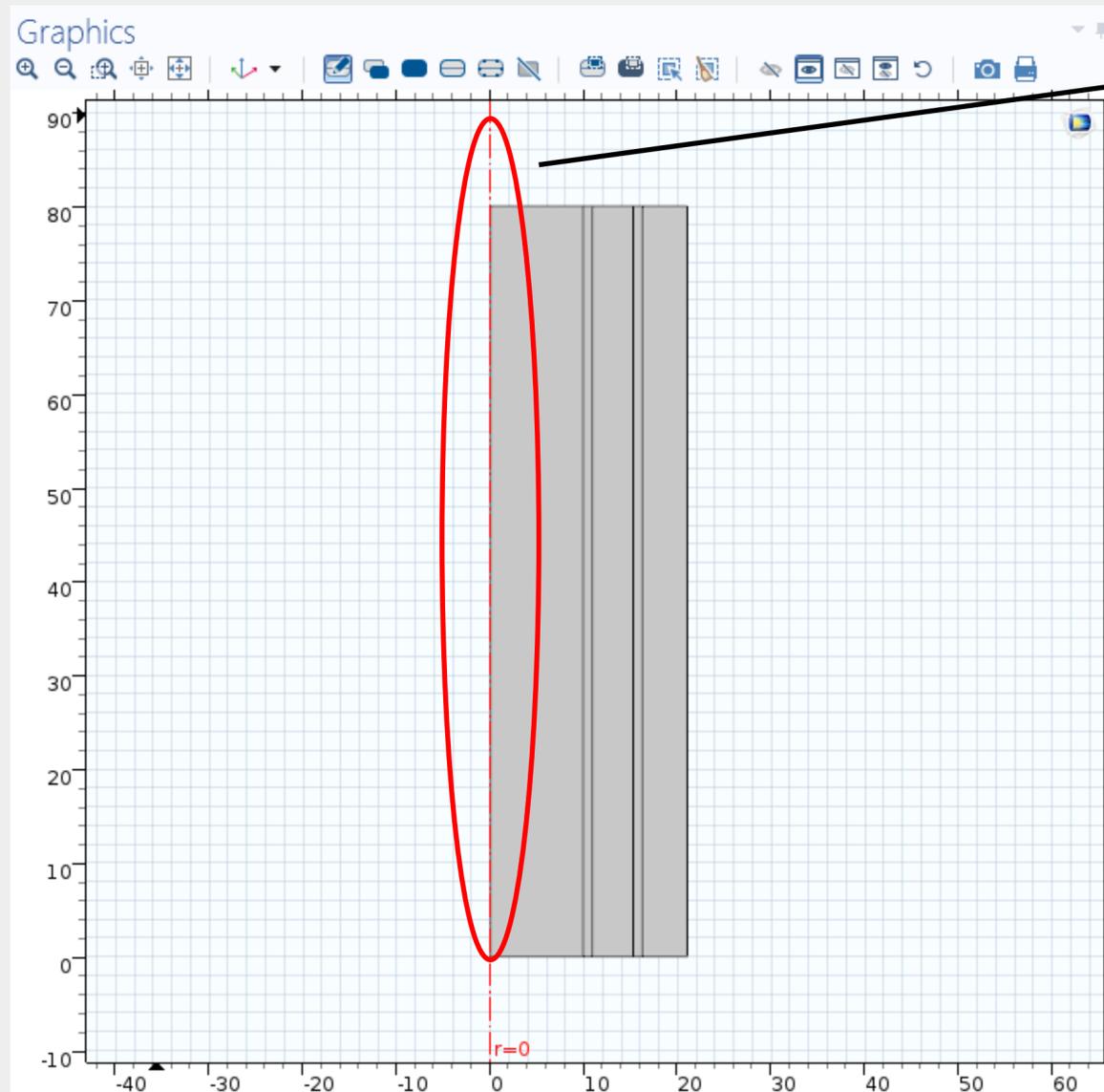


1. feature-based simplification

- Core : 자속을 생성, 반환하는 중심 경로
- Coil Slot gap : Coil과 Core 사이에 절연층이라 물성이 다름
- Coi Region : 자기장과 열의 원천 ($Q = I^2 \cdot R$, magnetic field source)
- MR Fluid Gap : 감쇠력이 발생하는 지점
- Housing : 경계조건 적용 및 물성 차이

- Geometry 1
 - Rectangle 1 _ Core (*r1*)
 - Rectangle 2 _ Coil Slot Gap (*r2*)
 - Rectangle 3 _ Coil Region (*r3*)
 - Rectangle 4 _ MR fluid gap (*r4*)
 - Rectangle 5 _ Housing (*r5*)
 - Form Union (*fin*)

<MR damper Geometry setting>



Axis of Symmetry

2. 2D axisymmetric 사용

- Damper : 원통형 구조 -> 3D를 사용하지 않음
- 계산량은 감소하지만 정확도가 유지될 수 있었음.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$$

- 모든 열, 유동해석에 필요한 지배방정식에서 각도에 따른 변화가 없다.

<Material setting>

- Materials
 - Copper (*mat1*)
 - Steel_custom (*mat2*)
 - Basic (*def*)
 - MR_fluid (*mat3*)
 - Coil_slot (*mat4*)

< copper : library 사용 >

<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*K)]
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	8960[kg/m ³]
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k	400[W/(m*K)]

<Steel, MR_fluid, coil_slot : custom>

<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	7800[kg/m ³]
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k	45
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	475

<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	2450
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	600
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k	0.25

<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k	0.2
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	1000
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	1000

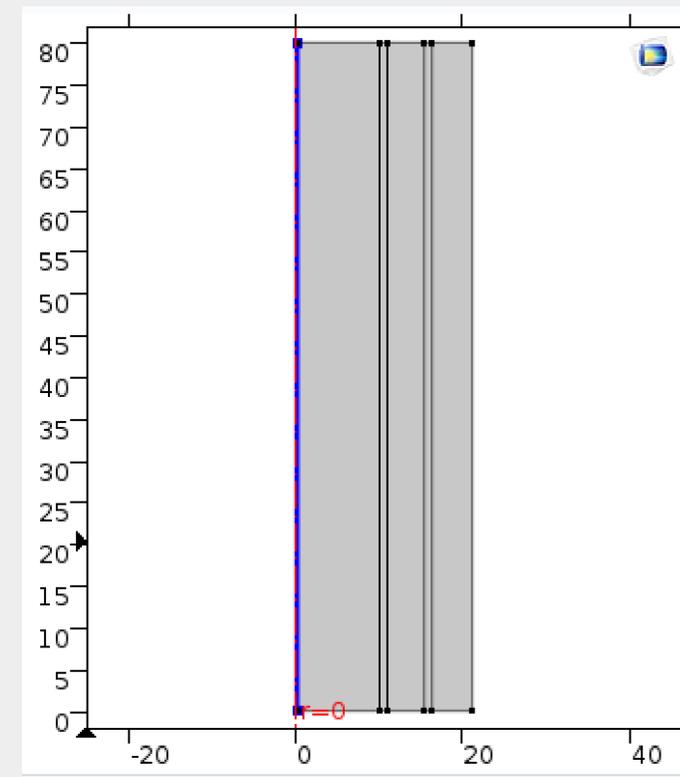
<Heat Transfer Physics setting>

- Heat Transfer in Solids (ht)
 - Heat Transfer in Solids 1
 - Initial Values 1
 - Axial Symmetry 1
 - Thermal Insulation 1
 - Heat Source 1
 - Heat Flux 1

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

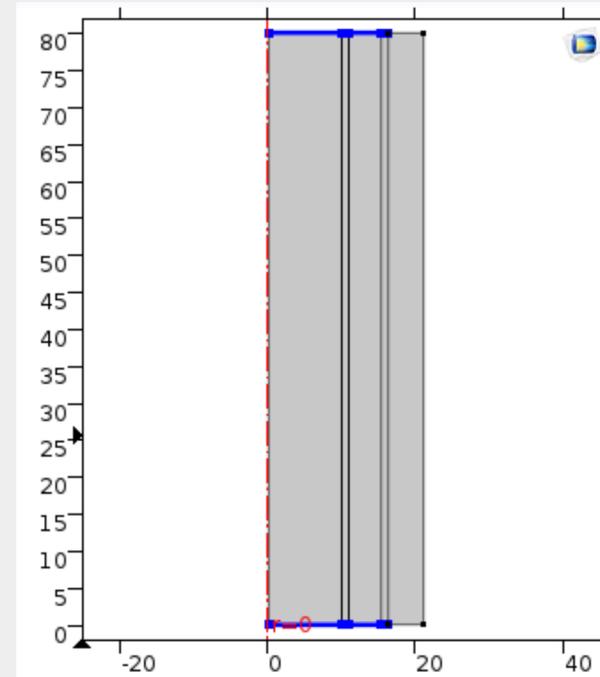
$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = 0$$



<Heat Transfer Physics setting>

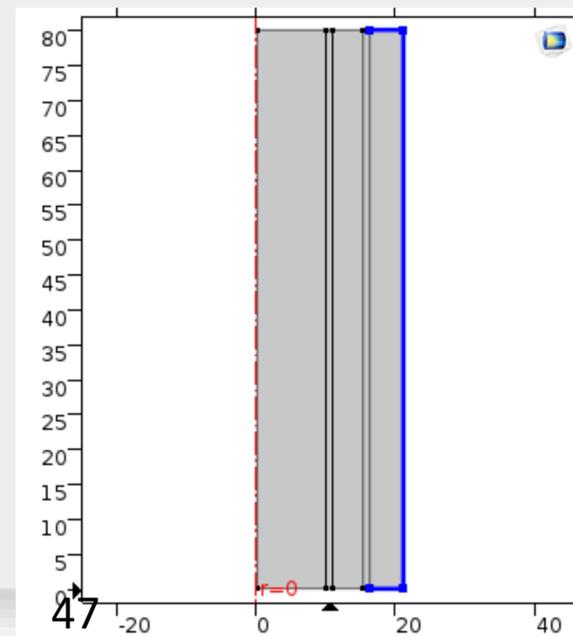
- Heat Transfer in Solids (ht)
 - Heat Transfer in Solids 1
 - Initial Values 1
 - Axial Symmetry 1
 - Thermal Insulation 1
 - Heat Source 1
 - Heat Flux 1

Housing 영역에서
외부로 열이 빠져나감.



$$n \cdot (k \nabla T) = 0$$

벽면에서 heat flux = 0 (단열)



Heat Flux

- General inward heat flux
- Convective heat flux

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T)$$

Heat transfer coefficient:

h W/(m²·K)

External temperature:

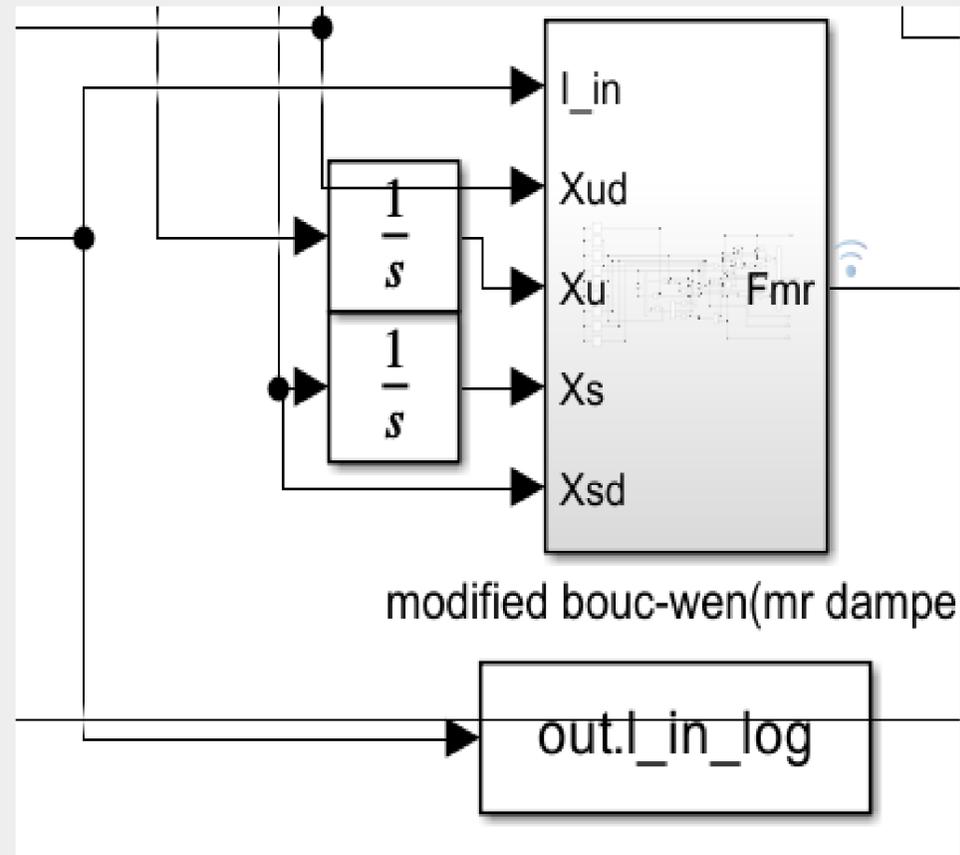
T_{ext} K

- Overall heat transfer rate

$$q_0 = \frac{P_0}{A}$$

<Heat Transfer Physics setting>

Q0 계산 방법



```

%comsol_heat
%simulink에서 I_in을 matlab으로 불러옴
t_raw = out.I_in_log.time;
I_raw = out.I_in_log.signals.values;

I_raw = double(I_raw);

I_norm = squeeze(I_raw);
t = t_raw(:);

%Rms current
T = t(end) - t(1);
Irms_norm = sqrt(trapz(t, I_norm.^2) / T);

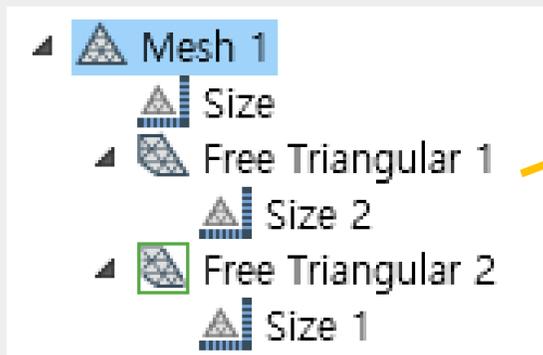
%G을 곱해서 physics와 가장 비슷한 형태의 I로 scaling
I_target_max = 1.0;
G = I_target_max / I_max_norm;

%Irms_phys 추출
Irms_phys = G * I_rms_norm;
R_coil = 5; %[ohm]
P_avg = I_rms_phys^2 * R_coil;
    
```

Q0	P_{avg} / V_{coil}
V_coil	$\pi \cdot (r_{co}^2 - r_{ci}^2) \cdot L_{coil}$

1. Simulink의 to workspace로 **I_in** 추출
2. Matlab에서 I_rms와 P_avg 계산
: **$P_{avg} = I_{rms}^2 \cdot R_{coil}$**
3. Comsol paramete에서 Q0계산
: **$Q0 = P_{avg} / V_{coil}$**
4. Coil Region에 Heat Source로 Q0 대입

<Mesh setting>



Element type:	All elements
Triangular elements:	34318
Edge elements:	1514
Vertex elements:	12
— Domain element statistics	
Number of elements:	34318
Minimum element quality:	0.5386
Average element quality:	0.9807
Element area ratio:	9.121E-4
Mesh area:	1684 mm ²
Maximum growth rate:	2.734
Average growth rate:	1.109

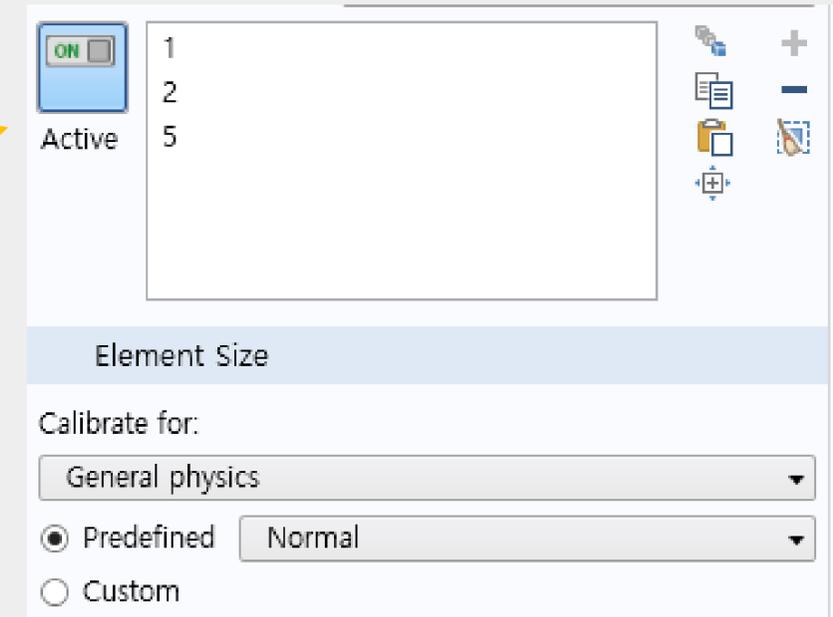
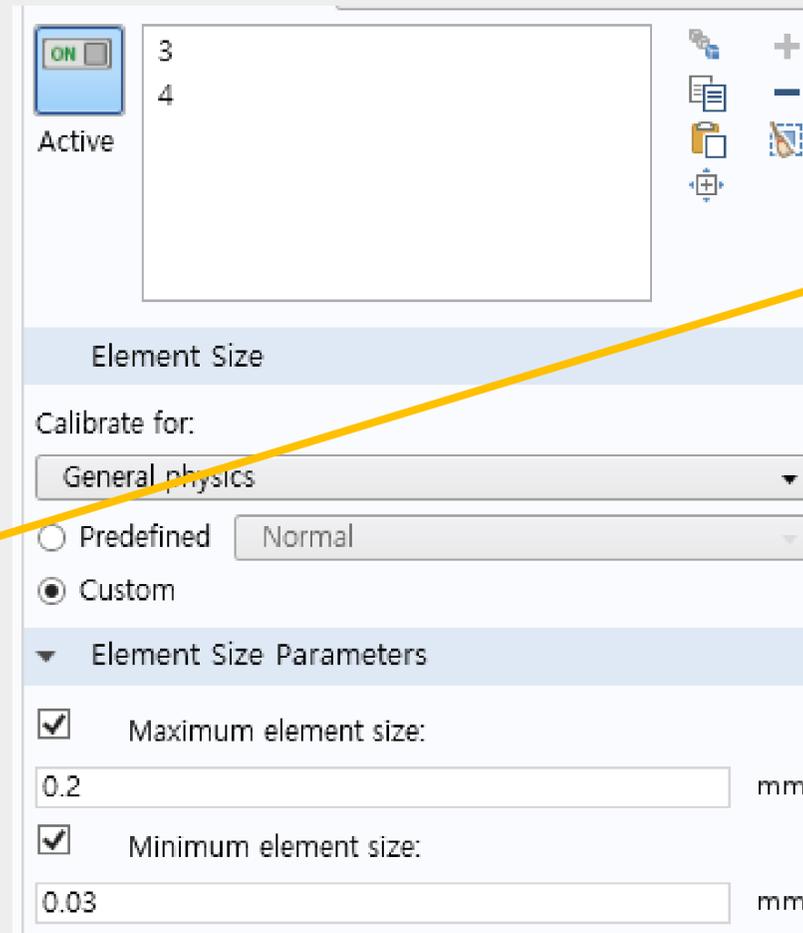
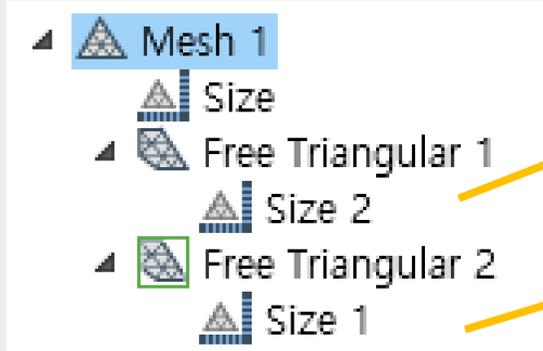
Element type:	All elements
Quadrilateral elements:	661
Edge elements:	310
Vertex elements:	12
— Domain element statistics	
Number of elements:	661
Minimum element quality:	0.2385
Average element quality:	0.7891
Element area ratio:	0.02476
Mesh area:	1684 mm ²
Maximum growth rate:	4.317
Average growth rate:	1.377

* 삼각형 요소 사용 이유

- MR damper geometry가 곡면과 얇은 gap으로 이어져 삼각형이 더 안정적
- Element quality

: Free Triangular mesh는 0.981, Free Quad mesh는 0.789로 약 19% 차이

<MR damper Mesh setting>



*** Coil, MR fluid gap : 촘촘한 mesh**

- 열 발생과 급격한 온도 기울기가 집중되는 구역
- 특히 얇은 mr fluid gap에 최소 5개의 요소가 두께 방향으로 존재하기 위해 maximum element size 지정

<Result>

• 물리적 타당성 검증

- 이론값과 Housing 영역에서의 온도 평균값을 비교함
- > 이론적 단순 열저항 모델에서는 약 18.7K 수준의 온도 상승 예상, COMSOL 해석에서는 하우스징 외벽 평균 약 13.4K 상승
- > 이론 예측과 해석 결과가 유사한 범위를 보이므로 모델이 타당함.

Results

- Data Sets
 - Study 1/Solution 1 (sol1)
 - Revolution 2D 1
- Views
- Derived Values
 - MAX Surface Maximum 1
 - AV Surface Average 1
 - MAX Volume Maximum 2
- Tables
- Temperature, 3D (ht)

Temperature (K)	
306.42	

In steady state

코일에서 발생하는 열 = 공기로 나가는 열

$$P_{coil} = Q_{conv}$$

$$Q_{conv} = h A_{surf} (T_{surf, avg} - T_{\infty})$$

$$\therefore \Delta T_{target} = \frac{P_{coil}}{h \cdot A}$$

$$P_{coil} = I_{rms}^2 \times R = 5W$$

$$h = 20 [W/m^2/K]$$

$$A_{surf} = 2\pi r L = 2\pi (0.0215)(0.08) \approx 0.0106 m^2$$

$$A_{top+bottom} = 2r^2 = 2\pi (0.0215)^2 = 0.028 m^2$$

$$\therefore A_{total} = 0.0134$$

$$\therefore \Delta T_{target} = \frac{5}{(0.0134)(20)} \approx 18.7K$$

<Result>

Temperature (K)	
308.01	=34.86°C



5 cm/sec @ 1 A	>2447 (>550)
20 cm/sec @ 0 A	<667 (<150)
Operating Temperature, °C (°F)	71 (160) max

- Results
 - Data Sets
 - Study 1/Solution 1 (sol1)
 - Revolution 2D 1
 - Views
 - Derived Values
 - MAX Surface Maximum 1
 - AV Surface Average 1
 - MAX Volume Maximum 2
 - Tables
 - Temperature, 3D (ht)

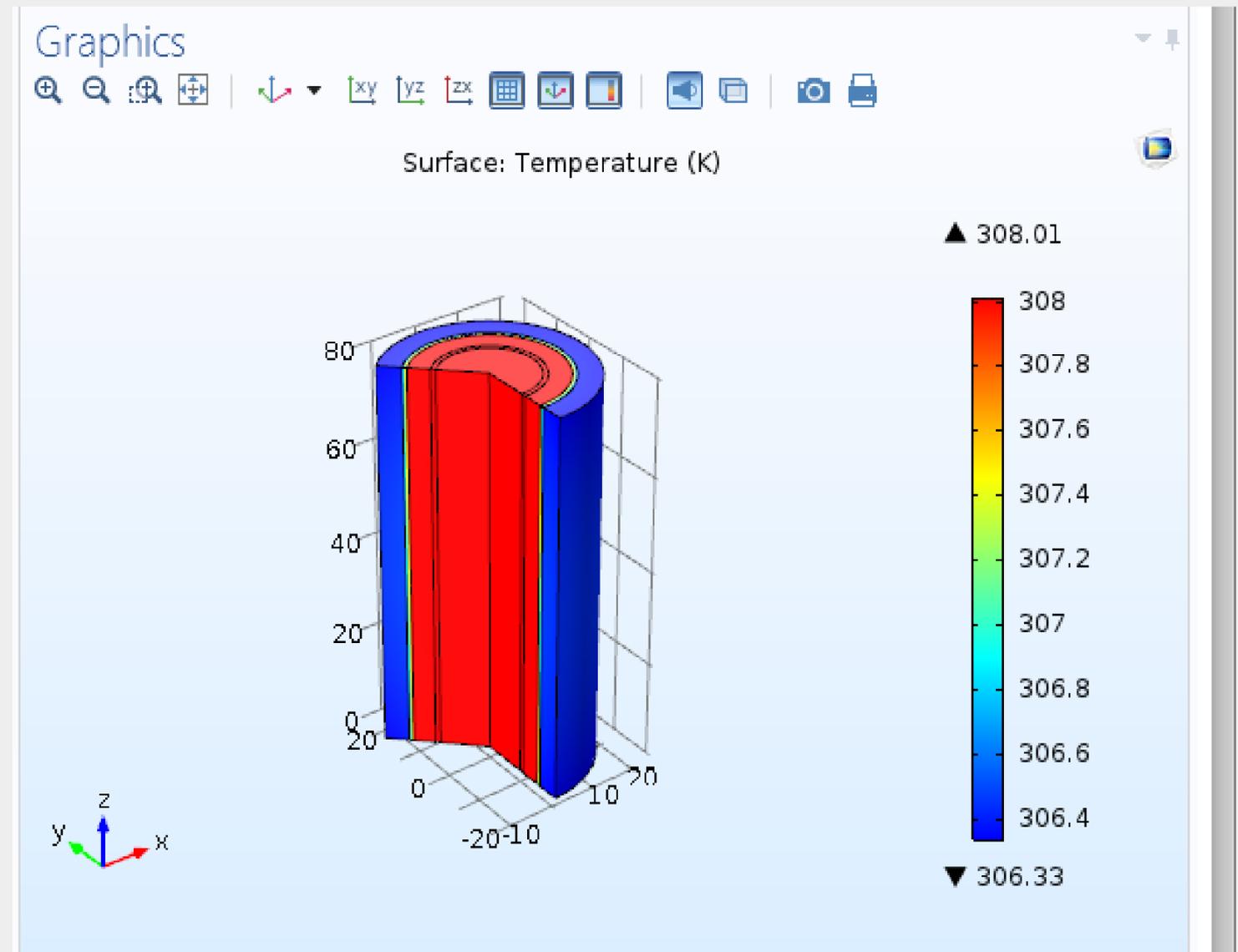
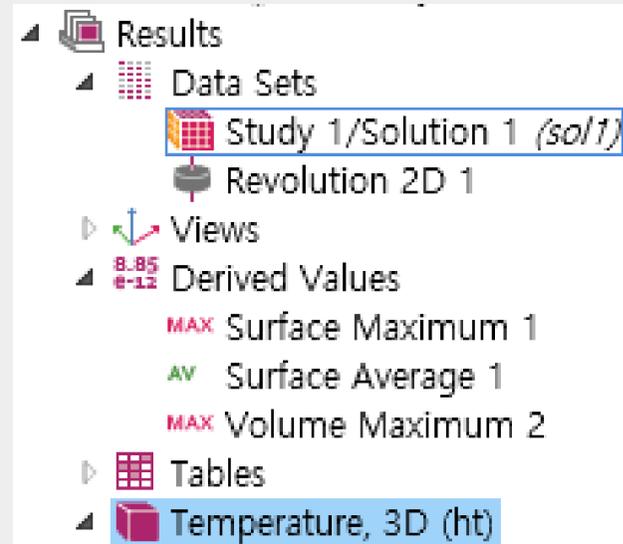
* Coil Region의 최대 온도

- 34.86°C 로 MR dampe의 datasheet에 있는 허용 온도인 71 °C보다 충분히 낮아 열적 안정성 확보

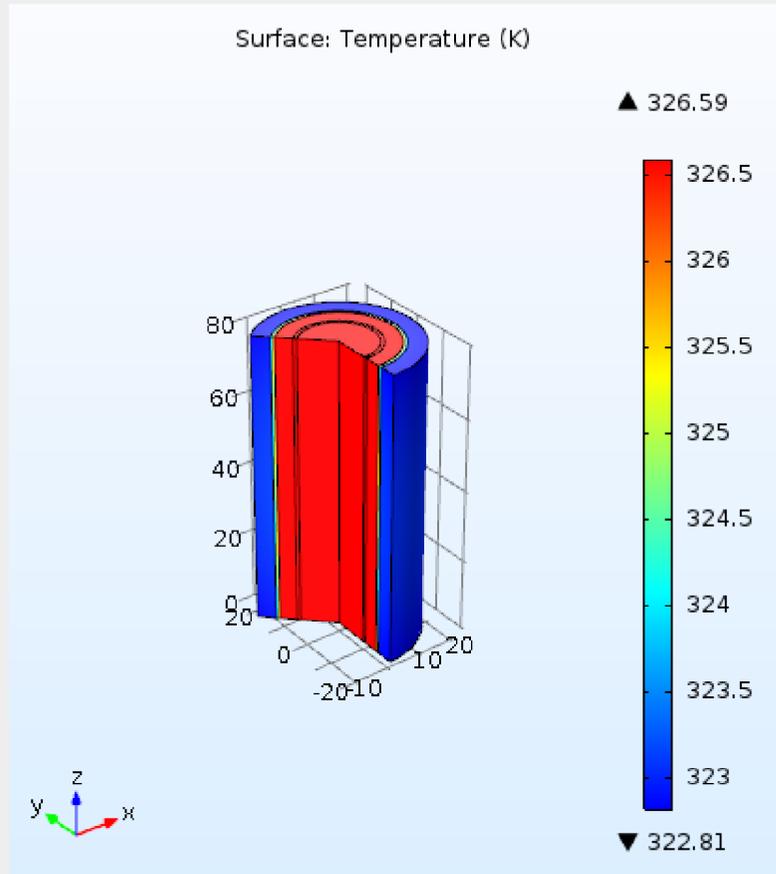
<Result>

- **Temperature Contour Plot**

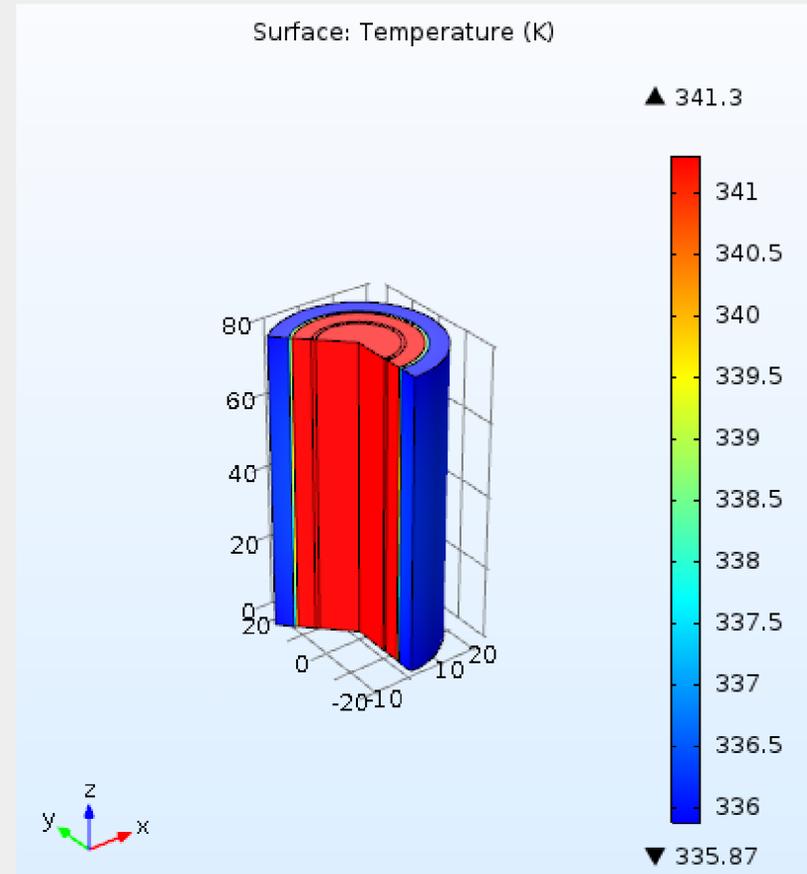
: 열은 코일에서 발생하여 코어와 하우징 방향으로 전달되며, 하우징 외벽에서 대류에 의해 제거되는 전형적인축대칭 열전달 구조 나타남.
 Temperature maximum은 308K, Surface Minimum : 306.3K으로 비교적 완만한 온도 경사 -> 시스템의 열적 거동 안정적



<Result>



(1) $I_{in} = 1.5A$



(1) $I_{in} = 1.8A$

• Maximum Safe Operating Current Analysis for MR damper

- 1.5 A 입력 시 최고 온도는 약 326.6K으로 열적 여유가 충분함
- 1.8 A 입력 시 최고 온도는 약 341.3K까지 상승하였으며, 이는 허용 온도 바로 아래
- > 1.8A까지는 안전하게 동작 가능, 1.5A 이하에서는 장시간 운전에도 열적 문제가 없는 강건한 설계



Magnetic Analysis

<MR damper Geometry setting>



Version1 / version2 -> 결과 페이지에 있음

<Material setting>



열 해석과 동일

<Magnetic Field Physics setting>

- Magnetic Fields (mf)
 - Ampère's Law 1
 - Axial Symmetry 1
 - Magnetic Insulation 1
 - Initial Values 1
 - External Current Density 1



External Current Density

External current density:

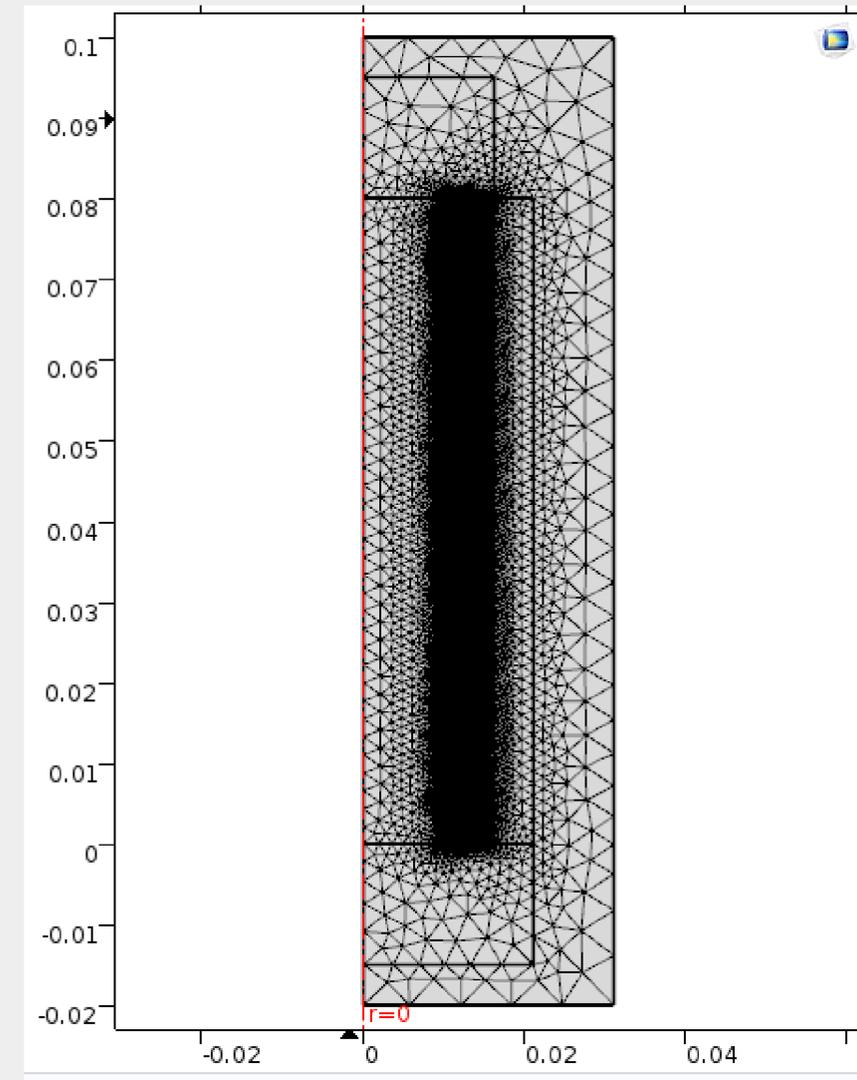
0	r		A/m ²
J_e $N_turn * I_max / (W_coil * L_coil)$	phi		
0	z		

Add contribution of the external current density to the losses

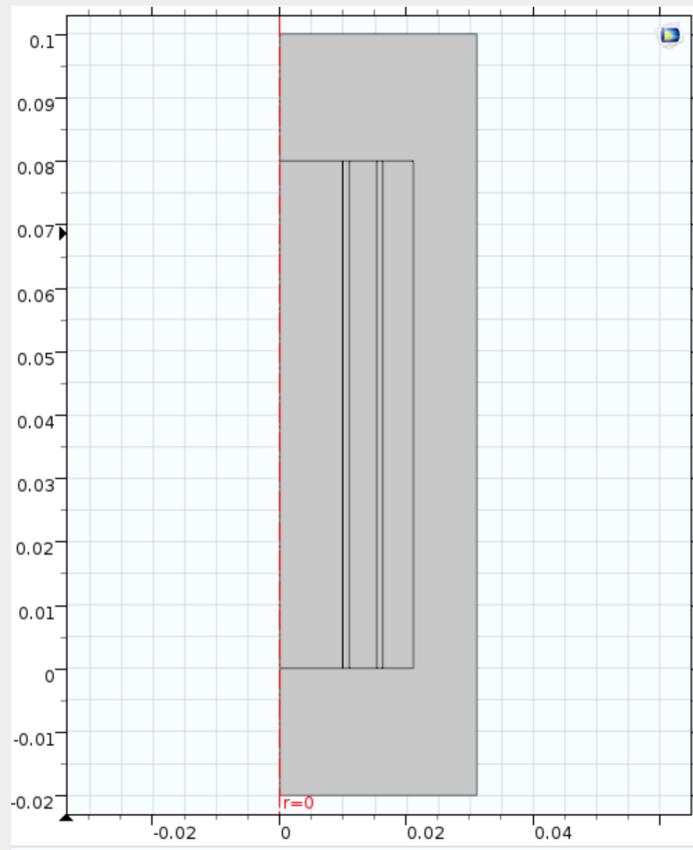
<Mesh setting>



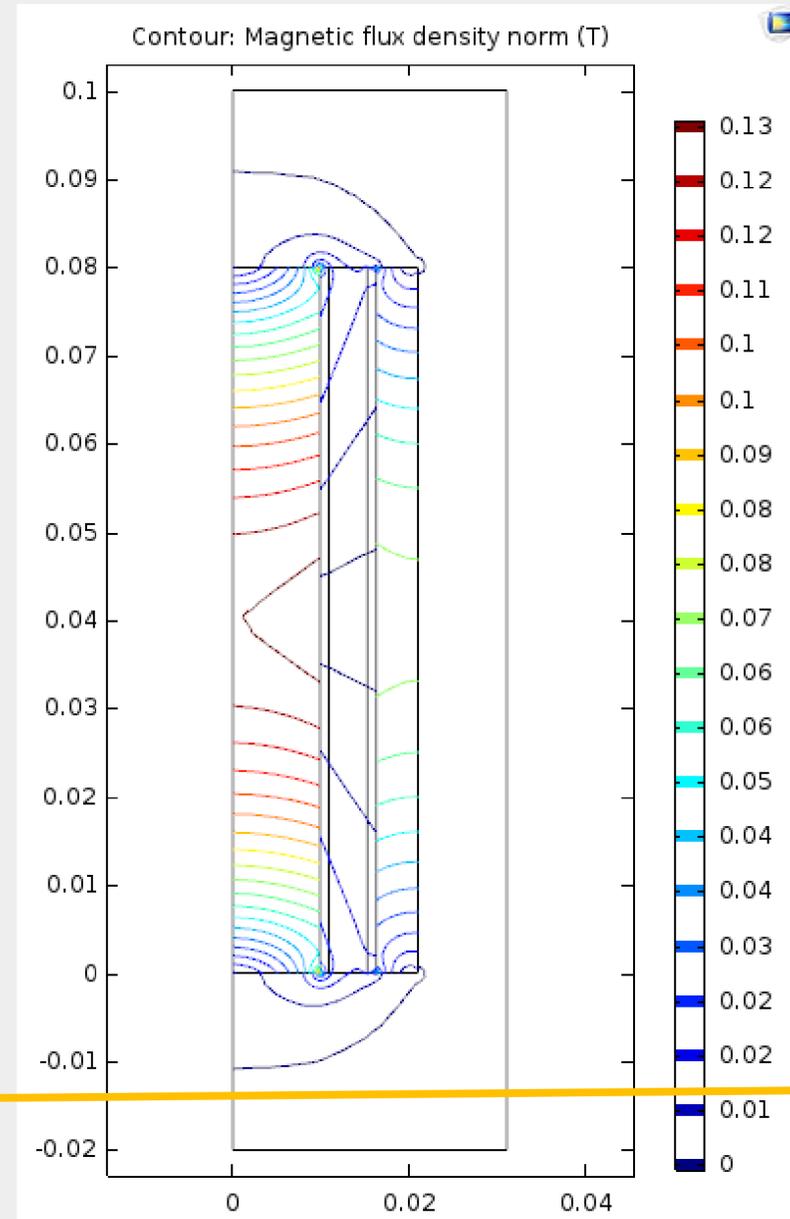
열 해석과 동일하나, 공기 부분은 거친 mesh를 사용



<Result – version1>



Magnetic flux density norm (T),
0.018709

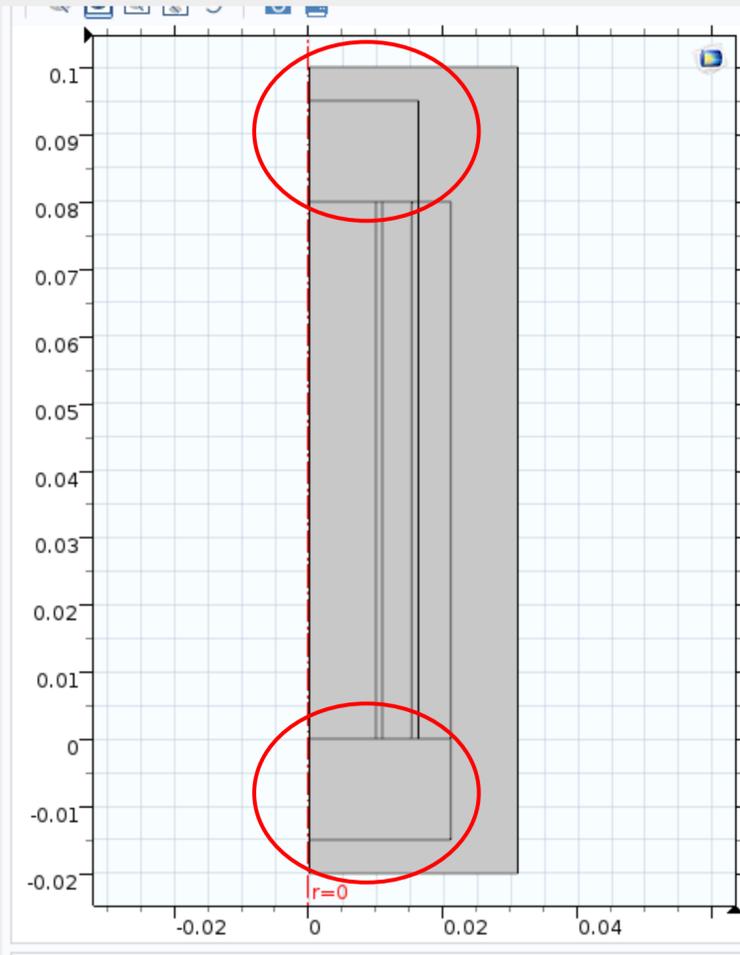


• 초기 설계의 결과

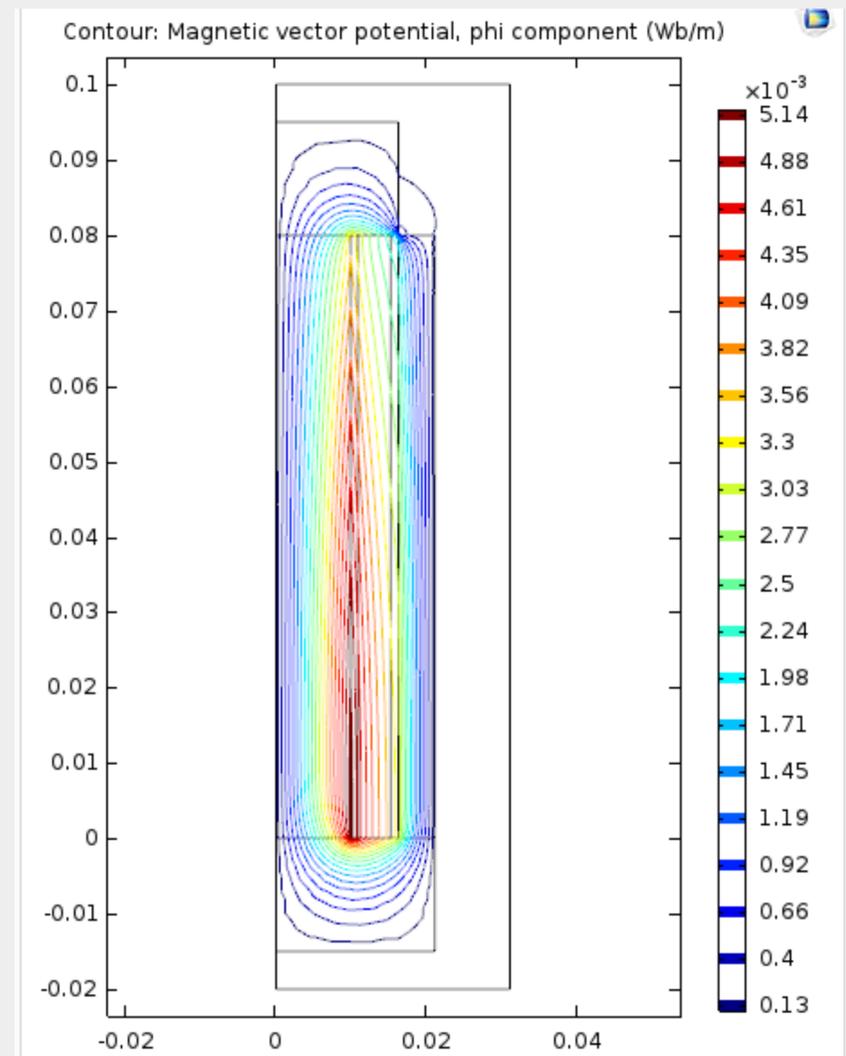
1. Flux line이 코어-하우징을 통해 닫힌 루프를 형성하지 못함-> 자기회로가 형성되지 않음
2. Magnetic flux density가 MR fluid gap에 거의 전달되지 않음
-> MR fluid gap에 **0.019T**의 아주 작은 flux density
-> MR damper 작동 불가능

MR fluid gap 영역에서의 flux density(T)

<Result – version2>



Magnetic flux density norm (T),
0.20551



• 개선된 설계의 결과

1. 자속 루프가 명확하게 닫힌 순환 경로를 형성
-> Core – 상부 Yoke – Housing – 하부 Yoke – Core로 이어지는 완전한 자기 회로의 형성
2. MR fluid gap 근처의 B-field 개선
-> gap 상단 지역에서 **0.206T**의 flux density
-> 전 model 보다 약 **984%** 증가한 결과
-> RD-8040 damper에서 MR gap 자속밀도의 목표인 0.3T와 유사한 값 도출

MR fluid gap 영역에서의 flux density(T)



- **주요 한계점1 : Gap 내부 B-field의 비균일성**

- Yoke 추가로 자속은 증가하였으나, MR gap 중앙부 자속이 낮고 end-effect가 지배적. -> 균일한 자속이 형성되지 않음.

- **주요 한계점2 : MR Gap 내 B-field가 설계 목표 대비 낮음**

- 약 0.019T에서 Yoke 추가로 0.206T까지 증가하였으나, 상용 MR damper가 목표로 하는 0.3T-0.5T 수준에 못미침

- **주요 한계 원인1 : COMSOL 5.2의 Coil Modeling 제한**

- Multi-turn coil 기능 미지원 -> external current density로 단순 근사
- 실제 coil winding 효과를 반영하지 못해 불균일하게 계산될 가능성 존재

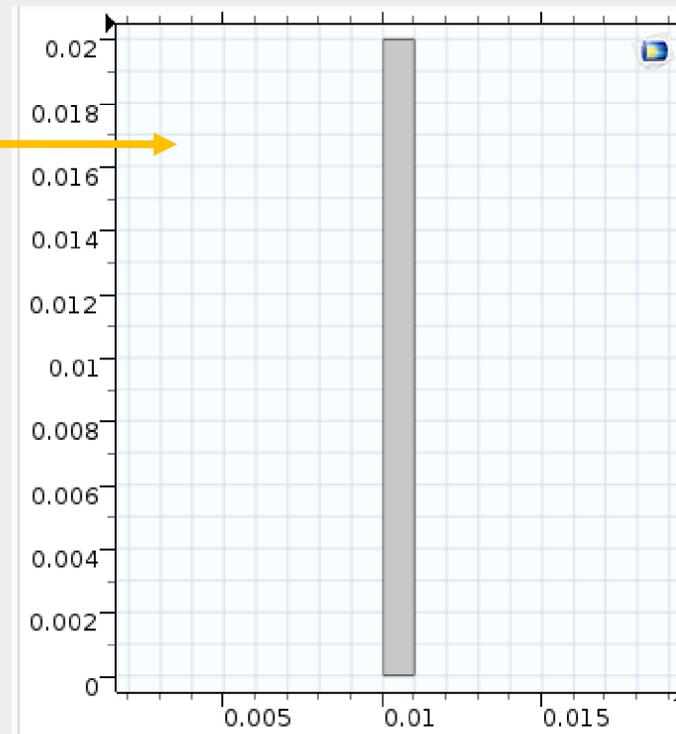
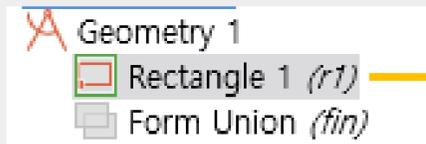
- **주요 한계점2 : Geometry 단순화로 인한 모델의 구조적 한계**

- 열 해석과 달리 자기장 해석은 vector field이기 때문에 2D 모델에서 조금만 geometry가 단순해져도 Flux path 자체가 뒤틀릴 수 있음. 따라서 sharp corner, gap의 두께 등에 큰 영향을 받아 결과 왜곡이 많이 된다.



Flow Analysis

<Geometry setting>



$$B \uparrow \Rightarrow \tau_y(B) \uparrow \Rightarrow \Delta p(\tau_y) \uparrow \Rightarrow F(\Delta p) \uparrow$$

$$\Delta p = f(\mu, U, h, L, \tau_y)$$

• Rectangle : MR fluid gap

1. 단순화한 이유

- 유동 해석 시 중요한 부분은 MR fluid gap의 유동 특성임.

2. 해석 목적

- 전체 감쇠력의 절댓값 x
- 전류 변화에 따른 유동 특성 변화

<Material setting>

Reference: Khedkar et al., Modeling and Simulation of MR Damper Using COMSOL (2012)

Label: muB

Definition

Data source: Local table

Function name: muB

t	f(t)
0	6.65
100	8.34
250	12.01
500	19.84
750	26.52
1000	32.50

Property	Name	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	2450	kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> Dynamic viscosity	mu	muB(B_...	Pa·s

Table 2: Effect of Magnetic Field on Dynamic Viscosity

Magnetic Field in Gauss	Dynamic Viscosity in centi Poise
0	6650
100	8340
250	12010
550	16000
700	22050
1000	22700

• 물성 구성 방식

- Dynamic Viscosity : 자기장에 따라 크게 변함
- muB table function 구성
- : 입력(B) – 출력(Dynamic Viscosity)

<Flow Physics setting>

- Laminar Flow (spf)
 - Fluid Properties 1
 - Initial Values 1
 - Axial Symmetry 1
 - Wall 1
 - Inlet 1
 - Outlet 1

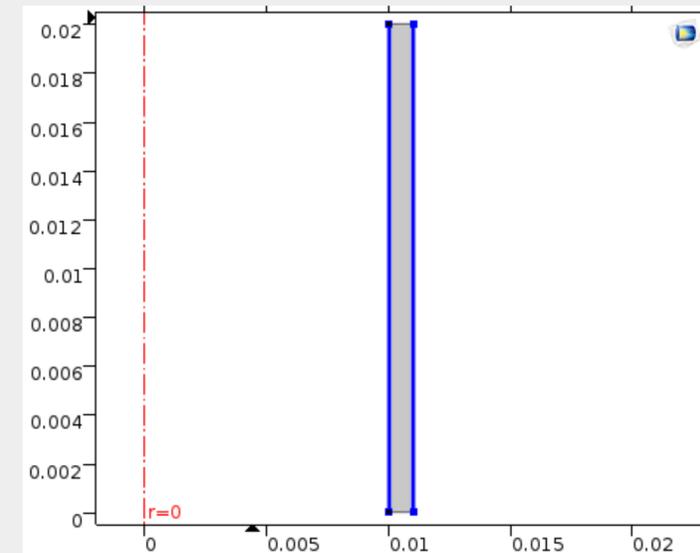
Navier - Stokes Equation

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

→ $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$, $\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = 0$ (정상상태, gap이 좁아짐)

∴ $-\nabla p + \mu(\rho) \nabla^2 \vec{u} = 0$

$$\vec{u} = 0$$

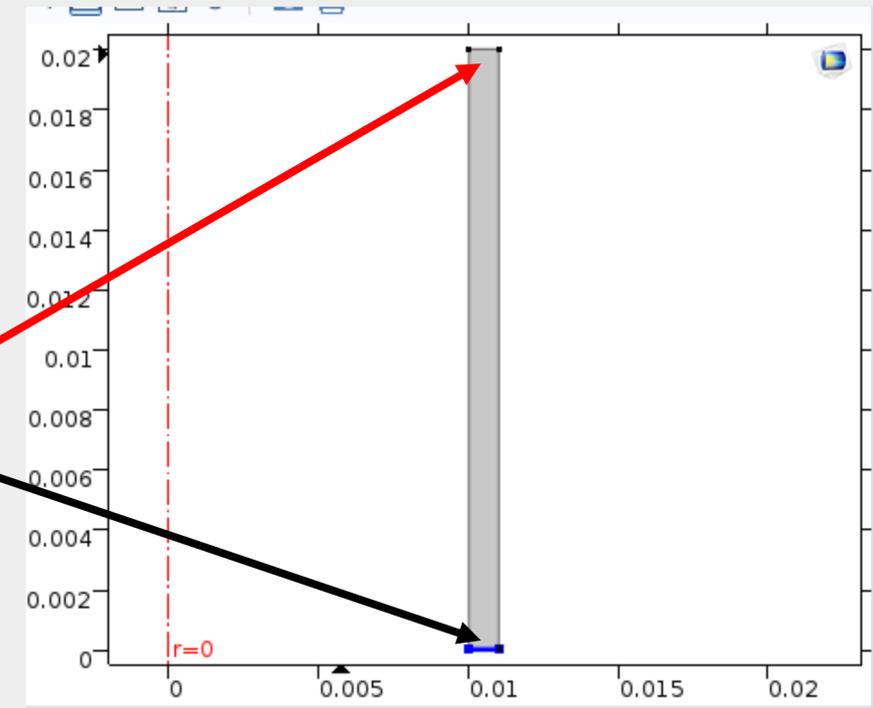


<Flow Physics setting>

- Laminar Flow (spf)
- Fluid Properties 1
- Initial Values 1
- Axial Symmetry 1
- Wall 1
- Inlet 1
- Outlet 1

Pressure:
 p_0 0

Pressure:
 p_0 1000



$$\Delta p = p_{out} - p_{in} = 1000 \text{ Pa}$$



<Mesh setting>

Element size:

Extra fine

Element size:

Finer



— Domain element statistics —

Number of elements:	262828
Minimum element quality:	0.05033
Average element quality:	0.8706
Element area ratio:	0.004625
Mesh area:	2.0E-5 m ²
Maximum growth rate:	4.332
Average growth rate:	1.381

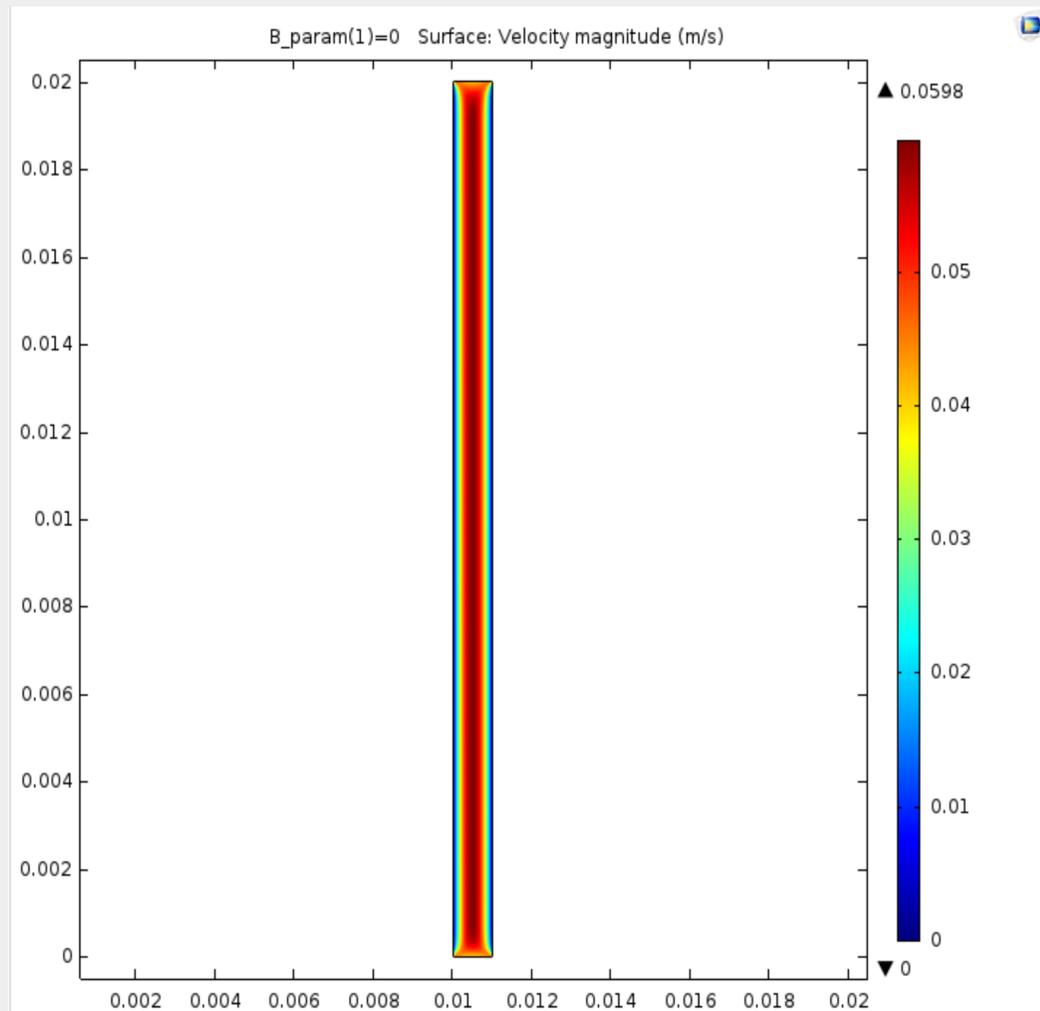


— Domain element statistics —

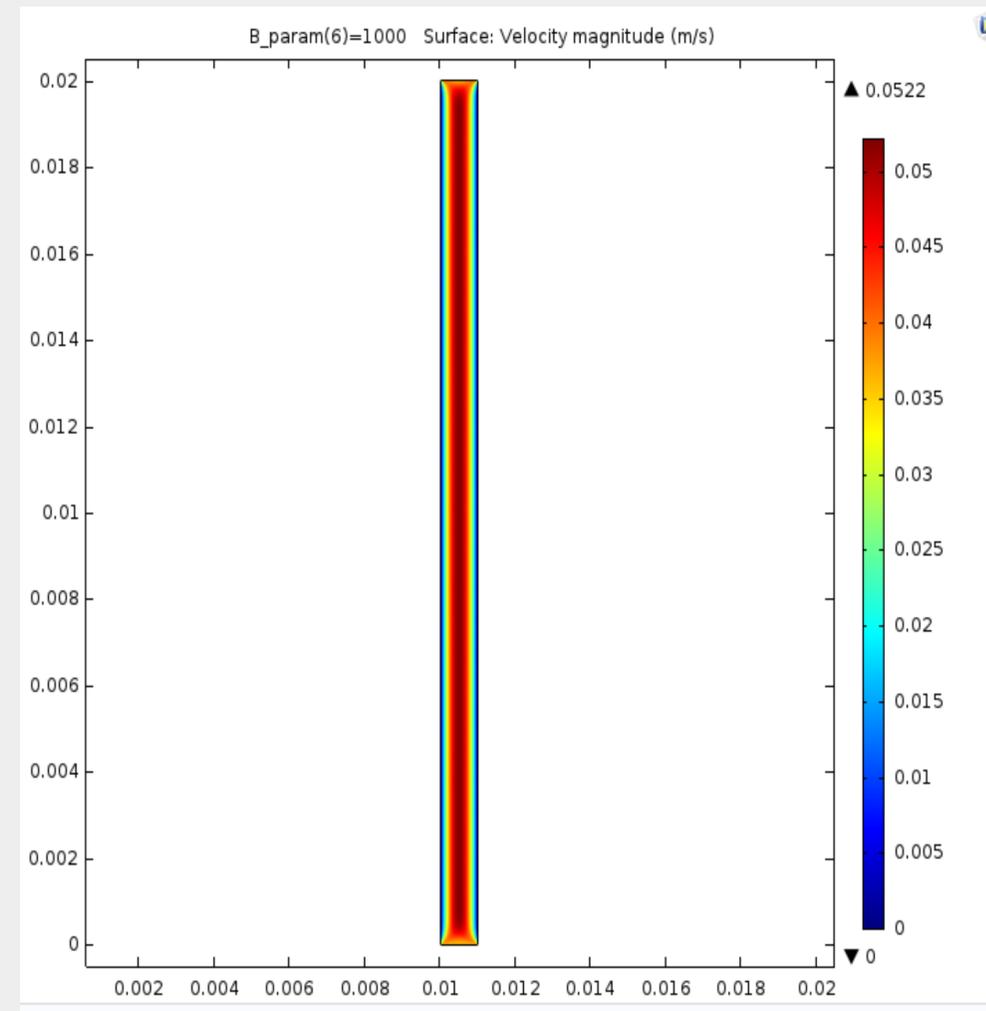
Number of elements:	98138
Minimum element quality:	0.3424
Average element quality:	0.9091
Element area ratio:	0.0342
Mesh area:	2.0E-5 m ²
Maximum growth rate:	2.309
Average growth rate:	1.264

<Result>

(1) B_param = 0일 때 MR fluid의 Velocity



(2) B_param = 1000일 때 MR fluid의 Velocity



- MR fluid gap 내부 유동 형태가 올바르게 재현

-> 중앙이 가장 빠르고 벽으로 갈수록 속도가 0인 Poiseuille flow 형태.

- B_param이 증가하면 속도 감소

-> 오른쪽의 colorbar을 보면 속도의 최댓값이 0.0522로 왼쪽의 0.0598과 비교하였을 때 더 작음. 흐름이 느려짐.

<Result>

Results

- Data Sets
- Views
- Derived Values
 - Global Evaluation 1
 - MAX Volume Maximum 1
 - AV p_in
 - AV p_out
 - Global Evaluation 2

B_param	Velocity magnitude (m/s)
0.0000	0.059800
100.00	0.059275
250.00	0.058165
500.00	0.055775
750.00	0.053826
1000.0	0.052161

- Step 1
: B param에 따른 velocity, P_in, P_out extraction

B_param	Pressure (Pa)
0.0000	465.37
100.00	457.06
250.00	439.60
500.00	404.90
750.00	377.84
1000.0	355.41

B_param	Pressure (Pa)
0.0000	533.93
100.00	542.10
250.00	559.29
500.00	593.54
750.00	620.32
1000.0	642.56

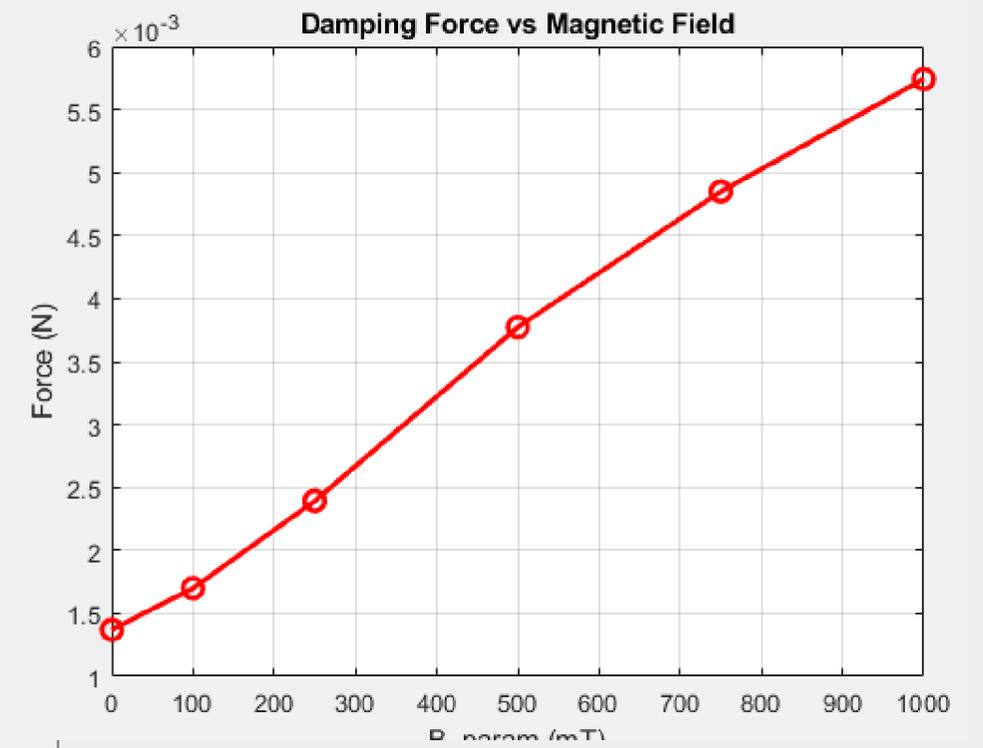
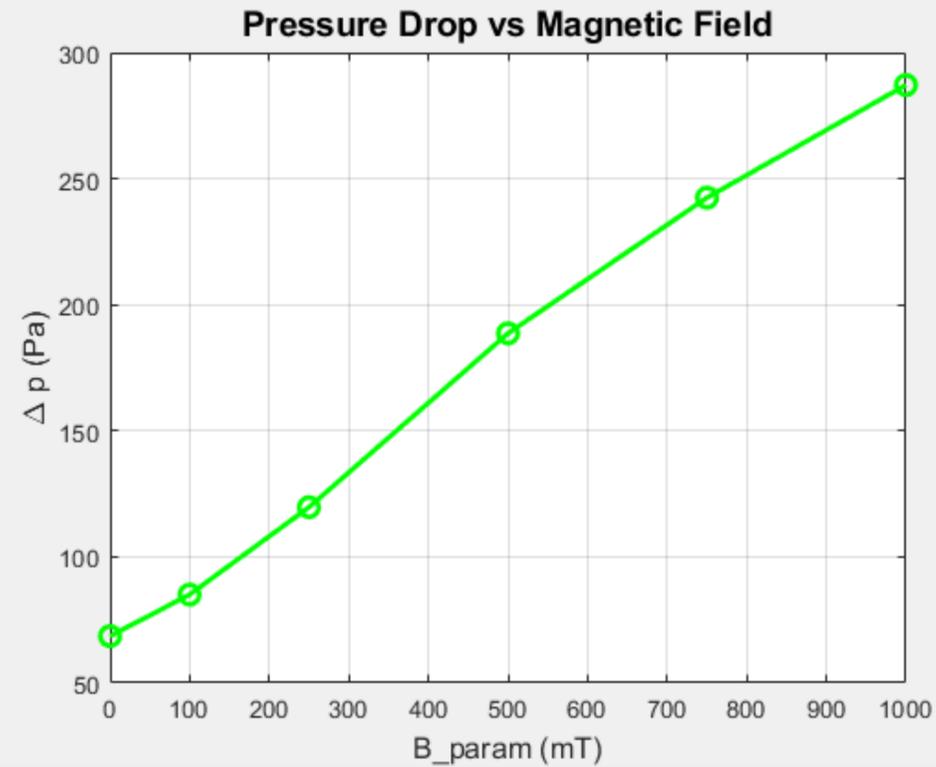
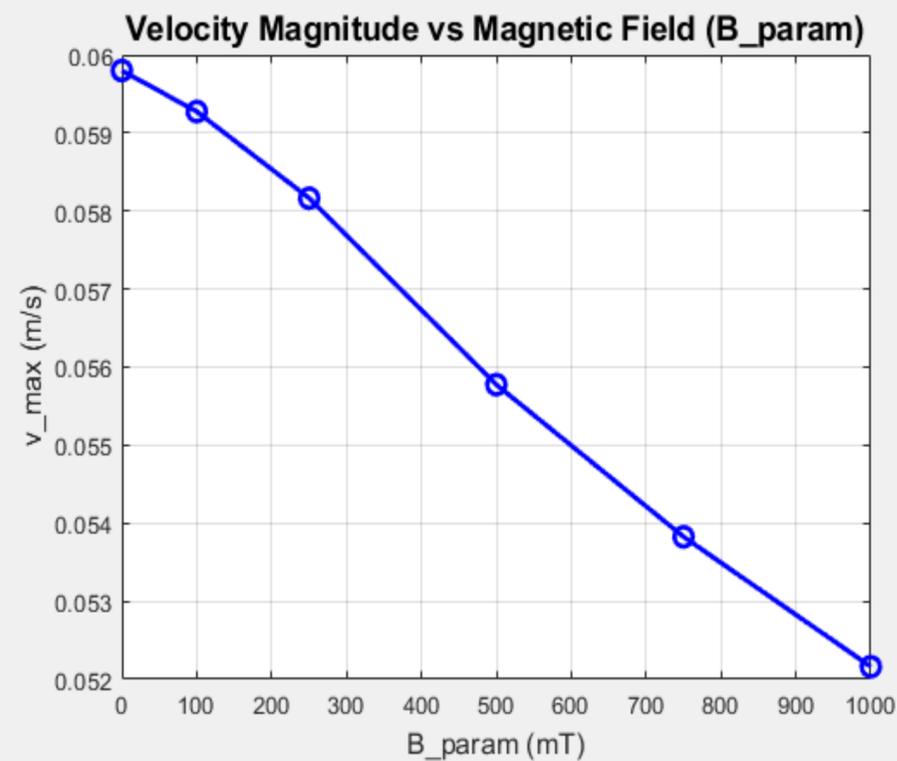
<Result>

- Step 2

: Matlab으로 graph 출력

- 자기장 증가에 따라

유속 감소 -> 압력 강하 증가 -> 감쇠력 증가라는 일관된 경향을 확인함.





- **MATLAB/SIMULINK 결론**

- Passive, General Bouc-Wen, Modified Bouc-Wen 세 모델 모두 실제 차량 동역학과 문헌 기반 MR damper 특성을 잘 재현함.
 - 다중 성능 지표로 최적 Q/R 조합을 자동 탐색하는 LQR 설계 프로세스 구축
 - 다양한 노면 입력 조건에서 일관된 성능 향상 확인
- ➔ **LQR 기반 제어는 MR 댐퍼 서스펜션의 핵심 성능 지표를 다양한 도로 입력에서도 일관되게 향상시키는 것으로 확인됨.**

- **COMSOL 결론**

- 열 해석 : MR damper의 열적 안정성 확인
 - 자기장 해석 : 자기 회로의 형성 메커니즘 규명 / 구조적 개선이 필요한 지점 확인
 - 유동 해석 : 자기장 강도 변화가 감쇠력 증가로 이어지는 MR damper의 동작 원리 확인
- ➔ **물리적으로 타당함을 보였고, 최적화 및 제어 알고리즘 적용이 가능한 damper 구조임을 보임.**

참고 논문 및 자료

re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO201015939077545&dbt=JAKO&koi=KISTI1.1003%2FJNL.JAKO201015939077545

<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=CFKO200814835304781&oCn=NPAP08302773&dbt=CFKO&journal=NPRO00293747>

<https://www.comsol.com/paper/modeling-and-simulation-of-mr-dampers-using-comsol-multiphysics-software-19805>

https://www.researchgate.net/profile/Ramasastry-Dva/publication/333707377_Analysis_and_Prediction_of_Performance_of_MR_Damper_at_Different_Currents_and_Control_Strategies_for_Quarter_Suspension_System_of_a_Roadway_Vehicle/links/5f4a3a88458515a88b84ab24/Analysis-and-Prediction-of-Performance-of-MR-Damper-at-Different-Currents-and-Control-Strategies-for-Quarter-Suspension-System-of-a-Roadway-Vehicle.pdf

<https://www.ijtp.com/IJTPE/IJTPE-2023/IJTPE-Issue54-Vol15-No1-Mar2023/8-IJTPE-Issue54-Vol15-No1-Mar2023-pp52-61.pdf>

<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO201015939077545&dbt=JAKO&koi=KISTI1.1003%2FJNL.JAKO201015939077545>

[Datasheet---MRF-132DG_MRFluid_DS7015.pdf](#)

[RD8041_datasheet.pdf](#)

[rymkhedkar_paper.pdf](#)

감사합니다.