

# 차량용 MR댐퍼의 제어성능 향상을 위한 유로의 기하학적 최적화

팀명 : MS.damper

팀원 : 서울과학기술대학교 안규빈, 임여은

지도교수 : 김민근 교수님

## I. 서론

- 연구배경
- 연구절차

## II. MR댐퍼 자기장 해석

- Modeling
- 자기장 해석
- 해석 결과

## III. Genetic Algorithm을 이용한 최적화

- 설계변수 설정
- DOE 수행
- GA 이용한 최적화 수행
- 결과 분석

## IV. 결론

- 결론

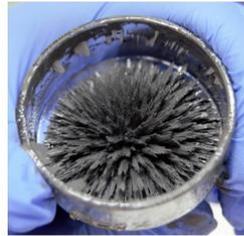
# I. 서론

- 연구배경
- 연구절차

## < 현재 >

### 일반 댐퍼

- 응답속도 ↓
- 감쇠력 조절 어려움



< mr fluid >

가변유체(ER, MR)를 이용한 <sup>[1]</sup>  
반능동형 현가장치 사용 증가

- MR댐퍼는 뛰어난 제어 안정성과 출력, 내구성을 가짐
- 실제로 자동차, 철도, 구조물 등 다양한 분야에서 상용화 되는 추세
- MR댐퍼의 감쇠력에 대한 선행연구에서는 자기장 형상에 의한 감쇠력만을 중점적으로 분석
- 또한, 제어성능에 대해서는 조명하지 않음
- 현실에서는 MR유체가 지나가는 통로(갭, 덕트)의 모양에 의해 댐퍼의 제어 성능이 좌우되는 경향
- 댐퍼의 제어 성능은 주행자의 만족감을 위한 중요한 요소
- 자기회로와 유로 형상까지 포함하는 보다 현실적인 MR댐퍼 유로 형상 최적화가 필요

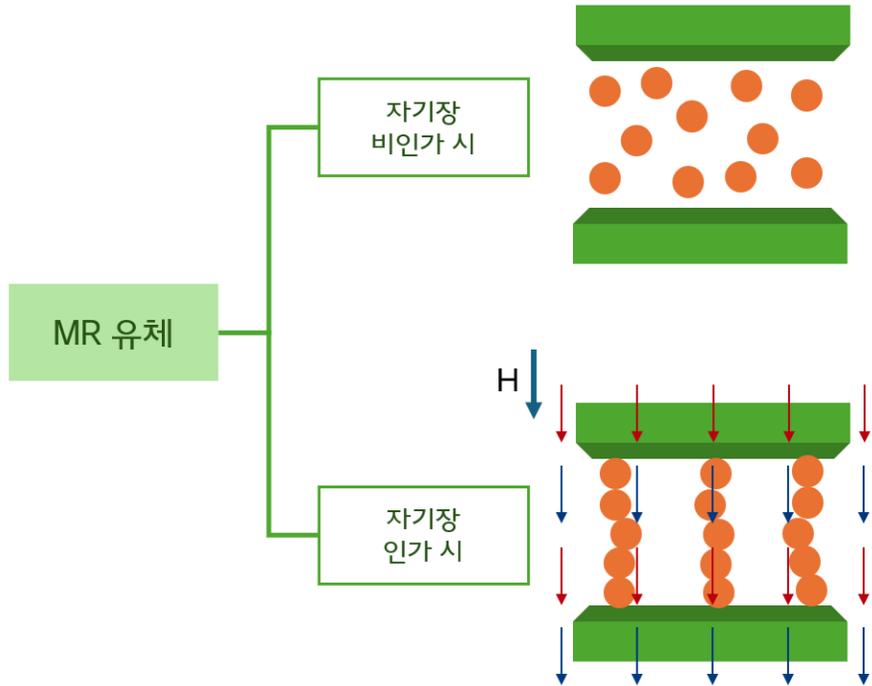


## < 목표 >

- 댐퍼의 제어성능 향상을 위한 유로의 최적화

# 1.1 연구배경

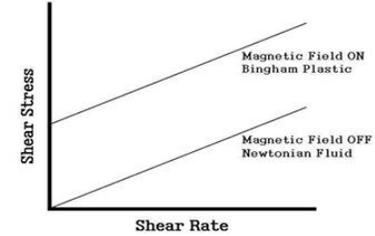
## ❖ MR유체의 특성 <sup>[2]</sup>



오일 속에 자성 입자가 랜덤하게 떠있는 형태  
=> 뉴턴유체

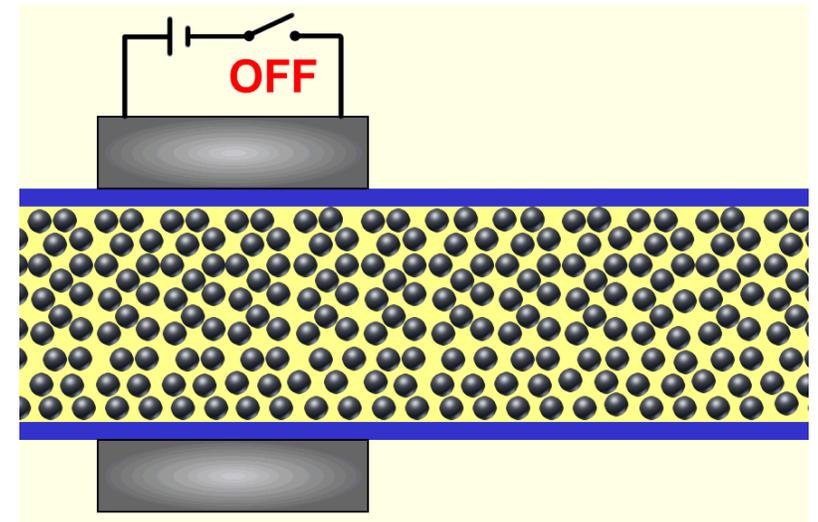
자성 입자들이 자화되기 시작하며 자기력에 의해 자기장 방향으로 체인구조 형성  
=> 빙햄유체

형성된 체인구조가 유체의 흐름을 방해  
=> 유체의 저항(=항복 전단응력  $\tau_y$ )이 증가



< MR유체의 전단응력 특성 >

- MR유체는 자기장의 변화에 따른 점도의 변화로 인해 기존의 유체보다 강한 전단력을 가짐



## 1.2 연구절차

< 목표 >

- 댐퍼의 제어성능 향상을 위한 유로의 최적화

< 목표 >

제어성능 최대화

[3]

$$F = \Delta P \cdot A_p$$

$\Delta P$ (압력강하) ↑

$$\Delta P_y = \frac{\tau_y L}{t_d}$$

$\tau_y$  ↑

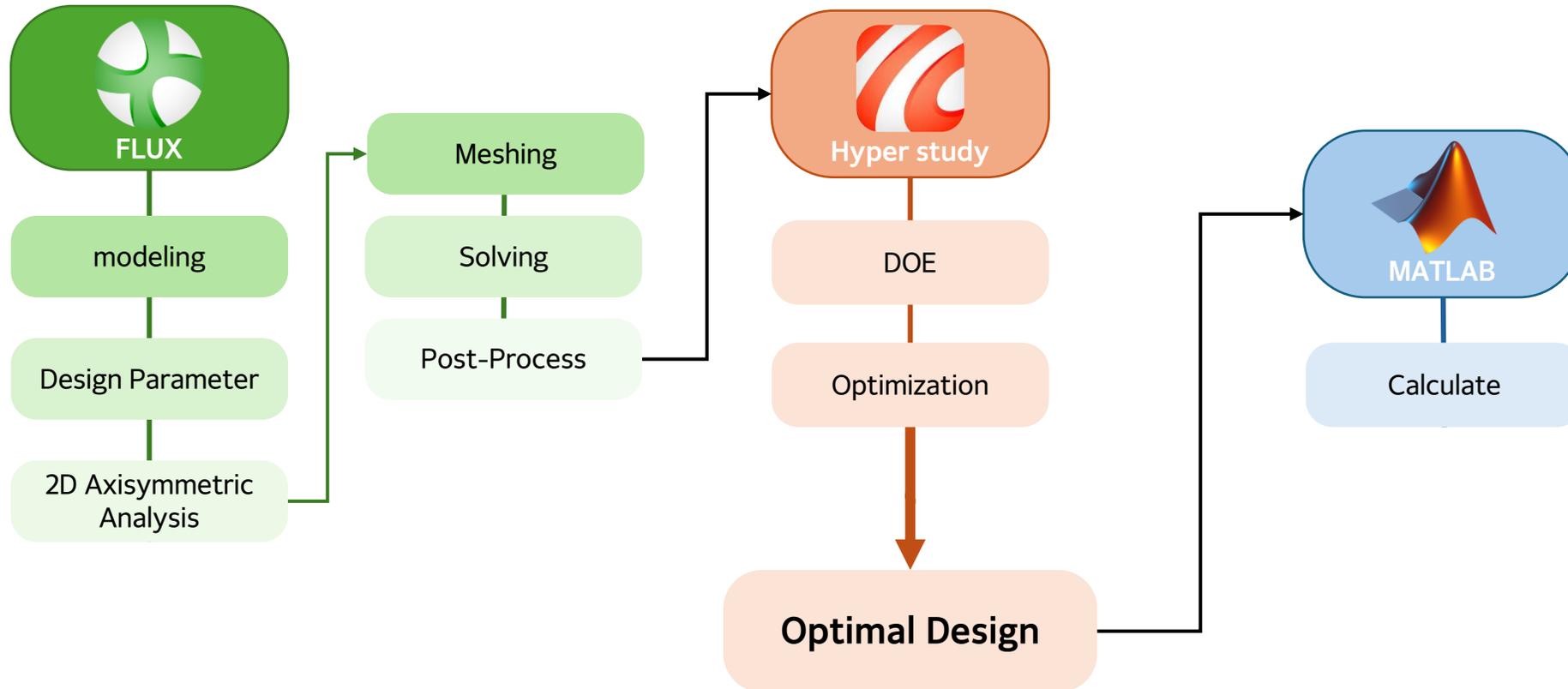
$$\tau_y = \alpha \cdot H^x$$

< 결과 >

$H$  (자기장 세기) ↑

“  $H$  최대화 필요 ”

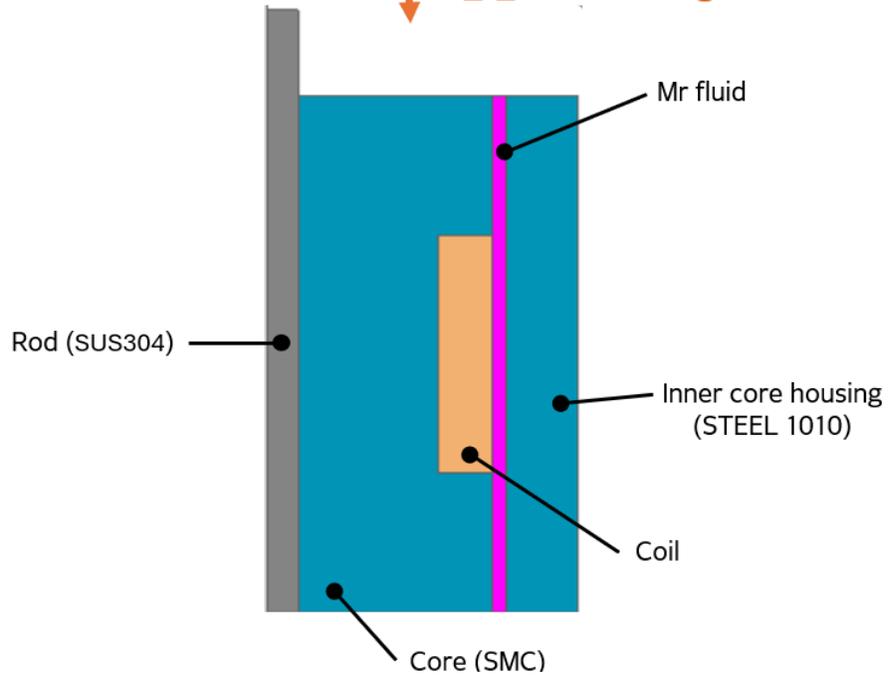
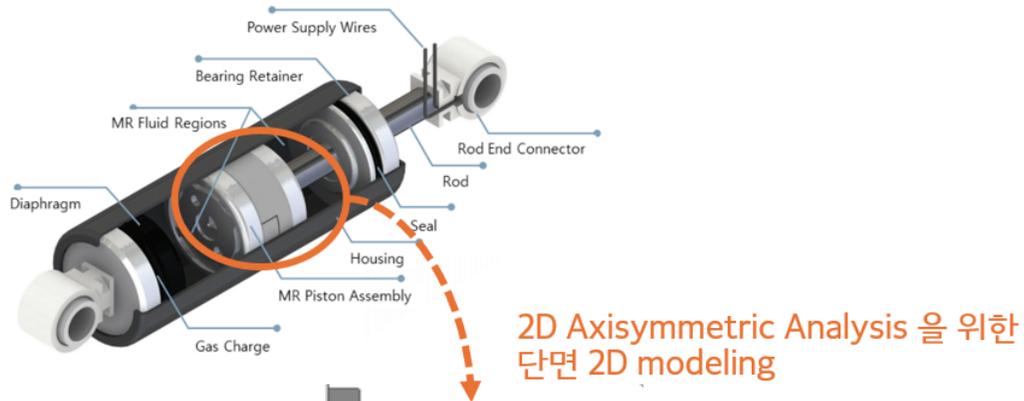
## 1.2 연구절차



## II . MR댐퍼 자기장 해석

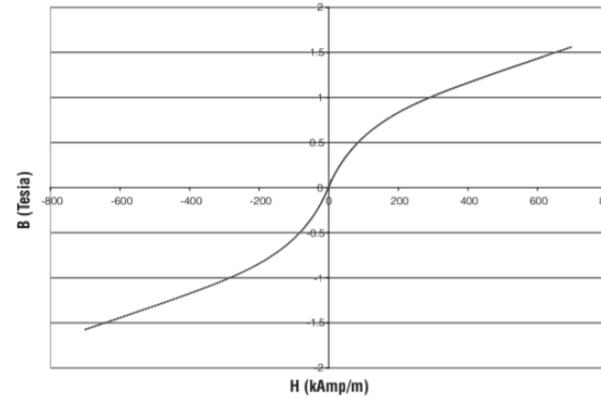
- Modeling
- 자기장 해석
- 해석 결과

# 2.1 Modeling



✓ MRF 물성치 LORD사 MRF-132DG 선정

< MRF B-H 곡선 >



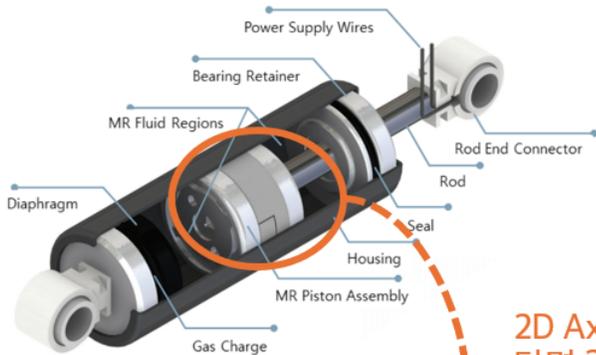
출처: LORD 공식 홈페이지

fitting

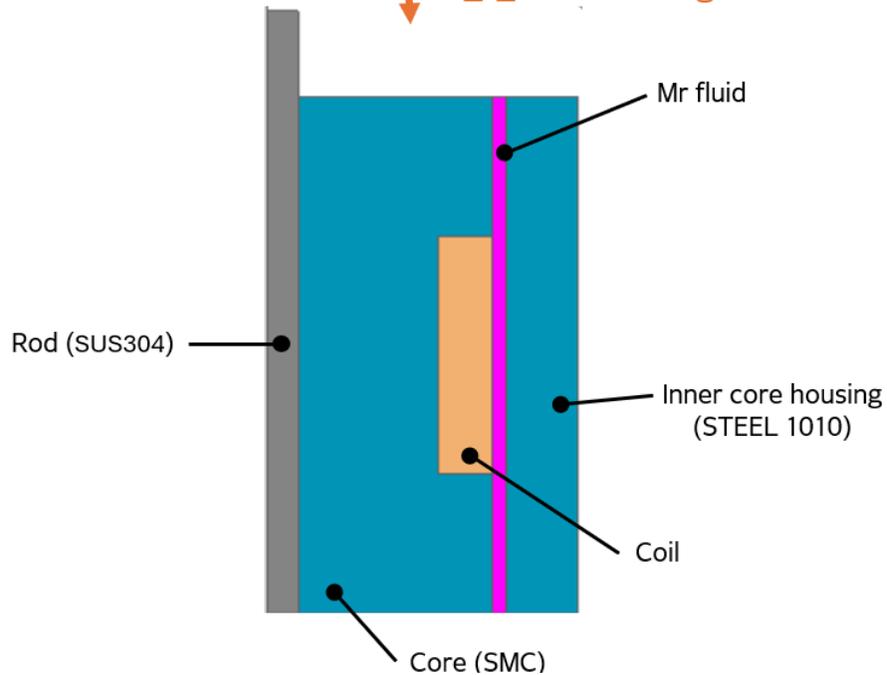
< Points of the spline curve >

Field value (A,m-1)	Flux density value (T)
0.0	0.0
10101.01	0.053852
20202.02	0.107582
30303.03	0.161069
40404.04	0.21419
959595.96	1.594678

# 2.1 Modeling



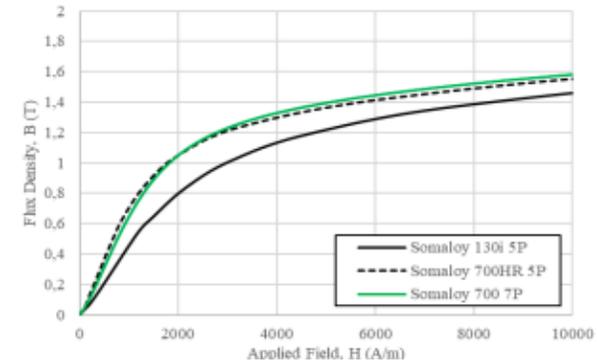
2D Axisymmetric Analysis 을 위한 단면 2D modeling



## ✓ SMC 물성치 (Core, Rod)

Höganäs사 Somaloy 700HR 선정

< SMC B-H 곡선 >



fitting

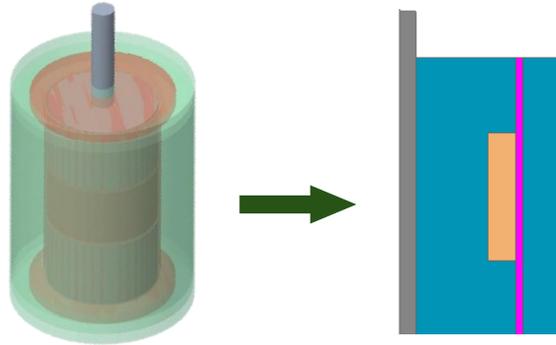
출처: Höganäs 공식 홈페이지

< Points of the spline curve >

Field value (A.m-1)	Flux density value (T)
0.0	0.0
15.0	0.01
45.0	0.05
80.0	0.1
150.0	0.2
230.0	0.3
320.0	0.4
430.0	0.5

## 2.2 자기장 해석

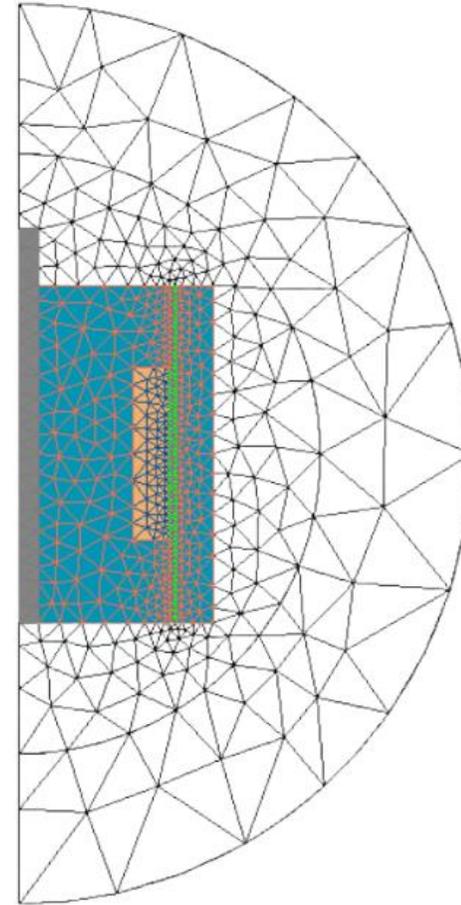
### < 2D Axisymmetric Analysis 기능 활용 >



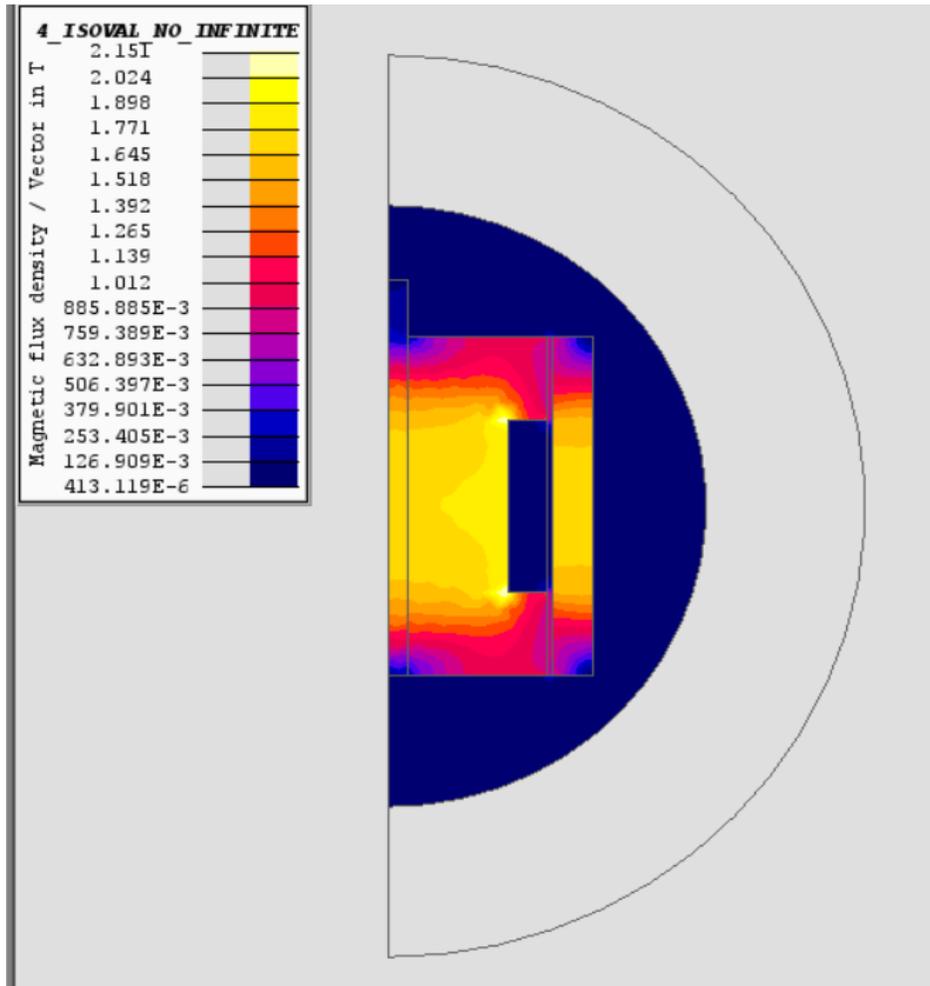
- 회전 대칭 구조물을 2차원 단면만으로 해석
- 보다 정밀한 메쉬 구성 가능
- 댐퍼의 원통형상을 보다 정확하고 간단하게 해석 가능

### < 해석 조건 >

- 일반 차량 주행 시 피스톤 속도 20~100mm/s  
-> 중앙값인 60mm/s로 설정
- MR유체의 점도 0.280 (LORD사 공식 물성치)
- 1A-5A의 전류를 인가



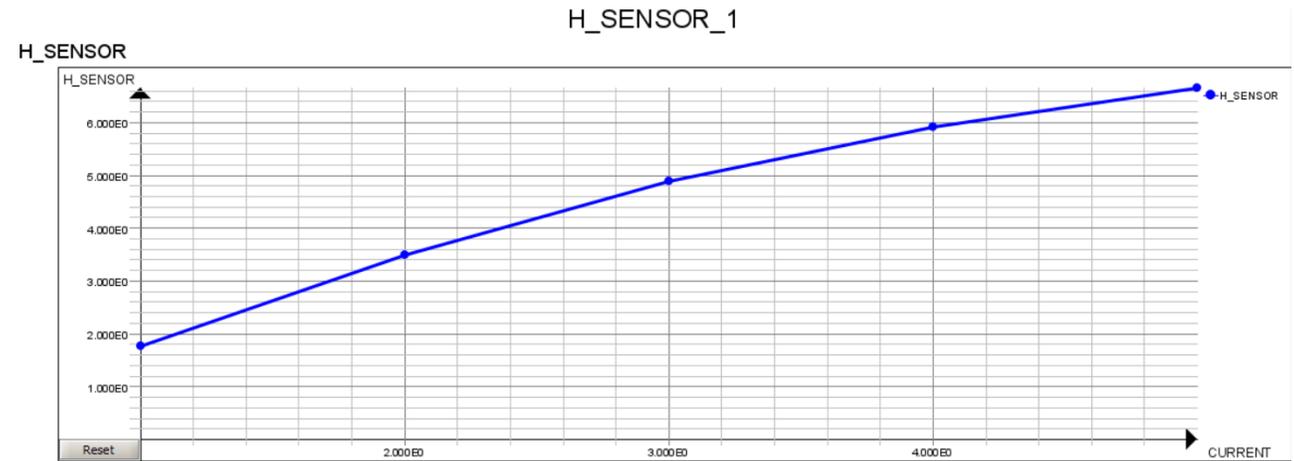
## 2.3 해석결과



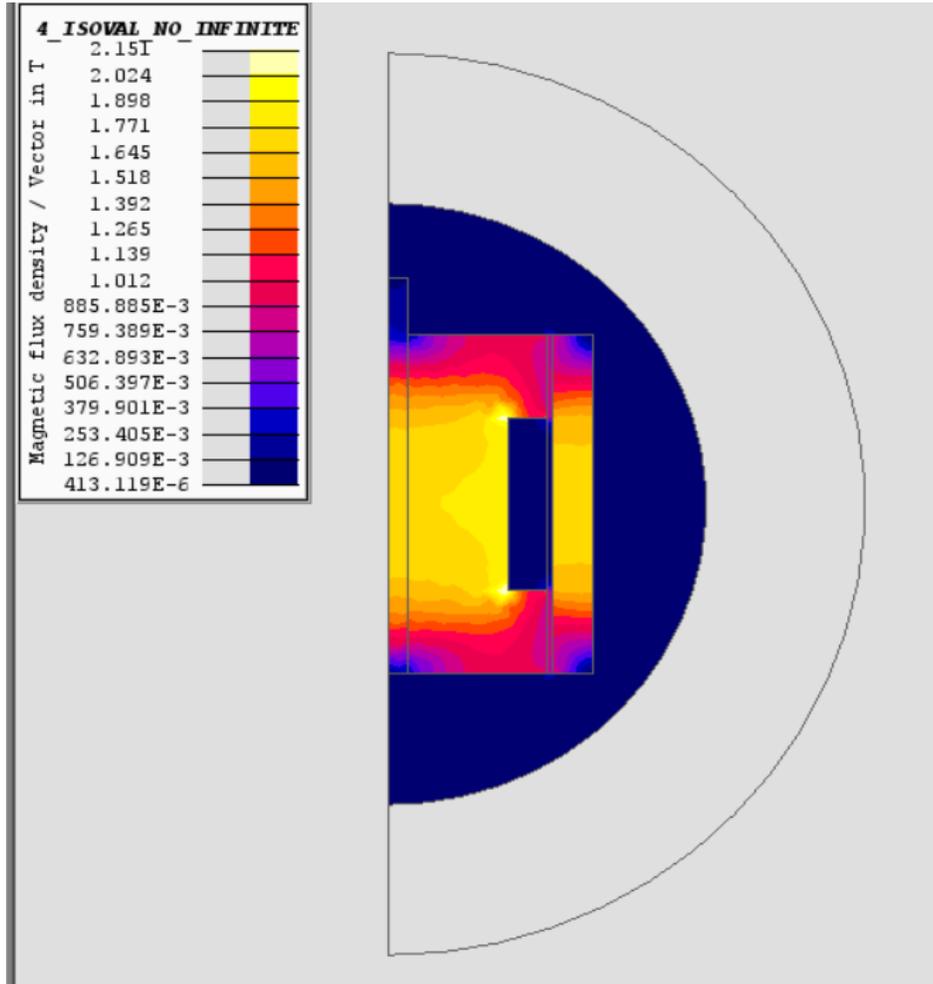
### < 해석결과 >

- MRF부에 SENSOR를 지정
- 1~5A까지의 자기장 세기(H)와 자속 밀도(B) 측정

CURRENT	H_SENSOR
1.000E0	1.77359E0
2.000E0	3.49648E0
3.000E0	4.89331E0
4.000E0	5.91732E0
5.000E0	6.64928E0



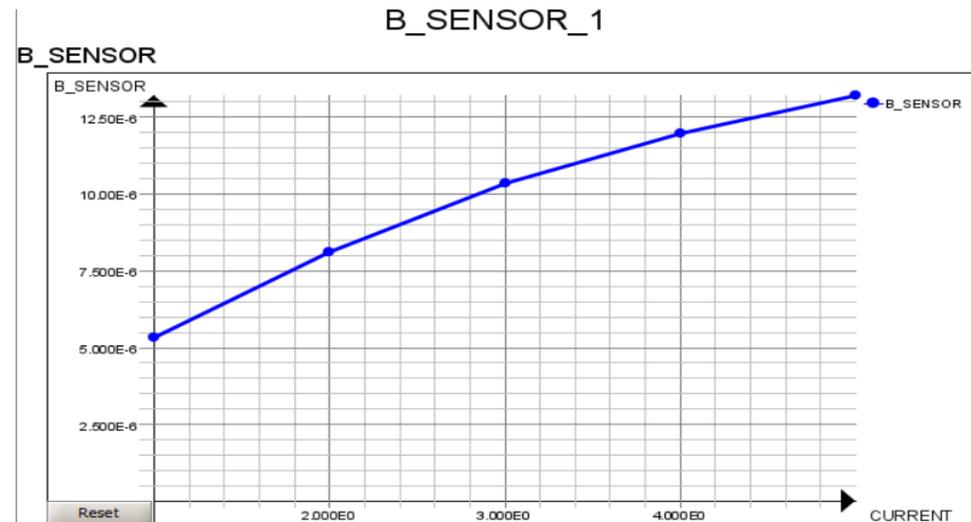
## 2.3 해석결과



### < 해석결과 >

- MRF부에 SENSOR를 지정
- 1~5A까지의 자기장 세기(H)와 자속 밀도(B) 측정

CURRENT	B_SENSOR
1.000E0	5.34654E-6
2.000E0	8.12528E-6
3.000E0	10.3489E-6
4.000E0	11.9769E-6
5.000E0	13.1986E-6



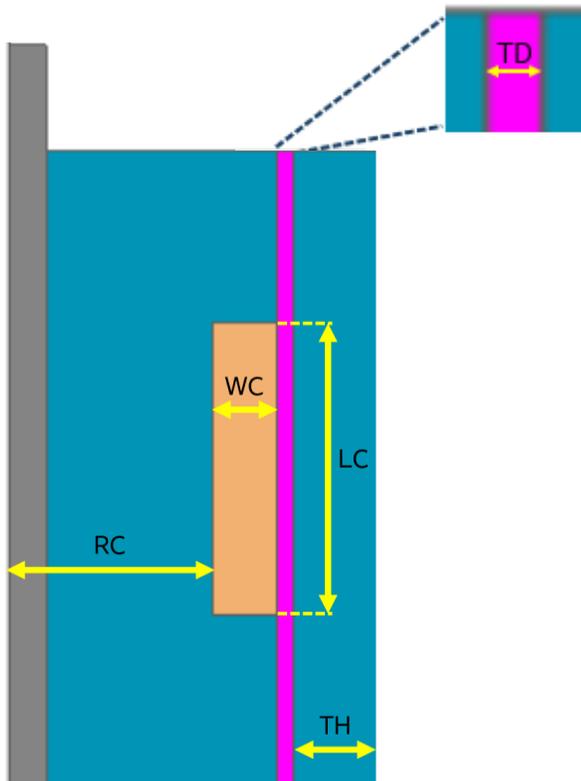
# III. Genetic Algorithm을 이용한 최적화

- 설계변수 설정
- DOE 수행
- GA 이용한 최적화 수행
- 결과 분석

# 3.1 최적화 문제 정식화

## ❖ 설계변수 설정

4개의 입력 변수의 변화를 통해 자기장 세기의 값을 최대화 하고,  
5A의 전류 인가시, 최소한의 감쇠력(1000N)을 유지하는 것을 목표로 최적화 진행



입력변수	
LC	코일 부 길이 [mm]
RC	코일 반지름 [mm]
TD	유동 갭 너비 [mm]
TH	피스톤 하우징 두께 [mm]

출력변수	
B	자속 밀도 [T]
H	자기장 세기 [A/m]
F	감쇠력 [N]
D	동적 범위

\*  $RC + WC = 20\text{mm}$  으로 고정

# 3.1 최적화 문제 정식화

- 목적함수 : 동적범위(D) 최대화

→ 제어 불가능한 힘과 제어 가능한 힘의 비 [4]

$$D = \frac{F_\tau}{F_\eta} = \frac{\Delta P_{yield} \cdot A_p}{\Delta P_{vis} \cdot A_p} = \frac{\Delta P_{yield}}{\Delta P_{vis}}$$

$$\Delta P_{yield} = \frac{\tau_y L}{t_d}, \quad \Delta P_{vis} = \frac{12\mu L v}{t_d^2}$$

$$\tau_y = \alpha \cdot H^x$$

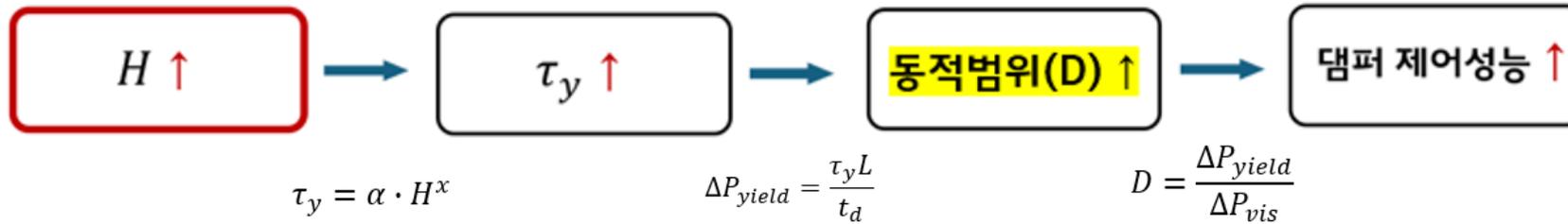
$A_p$  : 유효 단면적

$t_d$  : 유동갭의 폭

$L$  : 유동갭의 길이

$\mu$  : 점도

$v$  : 피스톤의 속도



- 제약조건 : 감쇠력  $\geq 1000N$

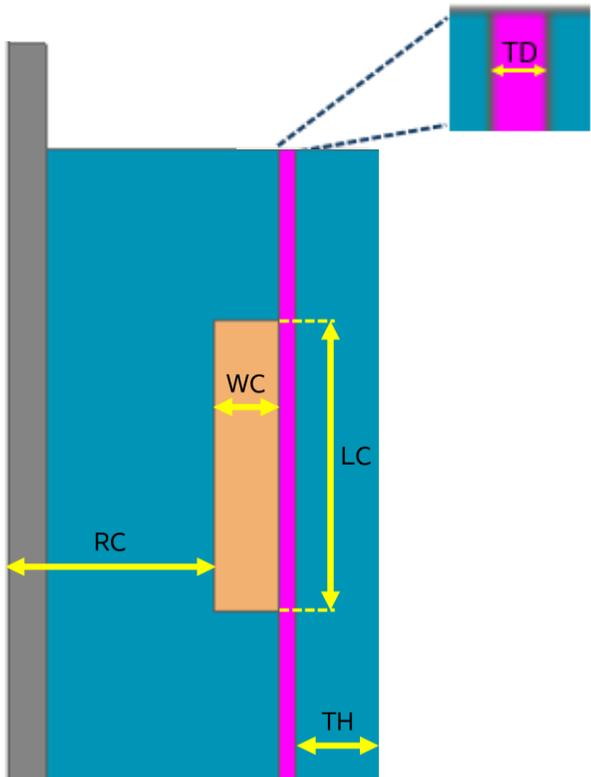
(설계된 MR 댐퍼가 최소한의 감쇠력을 확보해야만 실질적인 성능 확보 가능)

- 감쇠력  $\left\{ \begin{array}{l} \text{자기장에 의한 감쇠력 } F_\tau \\ \text{점성에 의한 감쇠력 } F_\eta \end{array} \right.$

$$F = F_\eta + F_\tau$$

# 3.1 최적화 문제 정식화

## ❖ 목적함수 설정



입력변수	
LC	코일 부 길이 [mm]
RC	코일 반지름 [mm]
TD	유동 갭 너비 [mm]
TH	피스톤 하우징 두께 [mm]

출력변수	
B	자속 밀도 [T]
H	자기장 세기 [A/m]
F	감쇠력 [N]
D	동적 범위

\*  $RC + WC = 20$  으로 고정

*Find*  $LC, RC, TD, TH$

*Maximiz*  $D$

*subject to*  $20.7 \leq LC [mm] \leq 25.3$   
 $13.5 \leq RC [mm] \leq 16.5$   
 $0.7 \leq TD [mm] \leq 1.2$   
 $4.0 \leq TH [mm] \leq 6.0$   
 $RC + WC = 20$

## 3.2 DOE 수행

설계변수가 출력에 미치는 영향과 변수간의 경향성을 보기 위해 Full-Factorial 방법을 이용한 실험계획법(DOE) 수행

$$\text{Runs} = 4! = 24$$

	LC	RC	TD	TH	D	DPVIS	DPY	MR_B	MR_H
1	23.460000	14.100000	0.9000000	5.6004609	9.61e-05	11200.000	1.0759989	1.52e-05	7.3966803
2	21.804000	14.340000	0.7800000	5.0404148	8.18e-05	14911.242	1.2199695	1.47e-05	7.3126452
3	23.644000	13.740000	1.0800000	5.4411062	1.26e-04	7777.7776	0.9797005	1.67e-05	7.8363758
4	21.988000	13.980000	0.9600000	4.8804840	1.08e-04	9843.7499	1.0634181	1.60e-05	7.6556441
5	22.908000	15.180000	0.8600000	4.0808296	8.25e-05	12266.089	1.0115852	1.45e-05	6.8973647
6	22.172000	13.620000	1.1400000	4.7205531	1.42e-04	6980.6093	0.9888625	1.76e-05	8.1669743
7	24.932000	14.220000	0.8400000	4.3210140	7.51e-05	12857.142	0.9655833	1.36e-05	6.5893267
8	21.436000	15.060000	0.9200000	5.3602765	1.18e-04	10718.336	1.2609036	1.69e-05	8.3208000
9	25.116000	13.860000	1.0200000	4.1616593	1.04e-04	8719.7228	0.9110710	1.53e-05	7.2005299
10	20.736800	14.628000	1.0360000	5.1680210	1.41e-04	8452.4679	1.1885219	1.81e-05	8.6506861
11	22.576800	14.028000	0.8360000	5.5682443	9.38e-05	12980.472	1.2169897	1.54e-05	7.6386283
12	23.496800	15.228000	0.7360000	4.7685900	6.83e-05	16747.400	1.1432003	1.35e-05	6.7488291

- DPVIS : 점성에 의한 압력강하
- DPY : 자기장에 의한 압력강하
- MR\_B : MRF의 자속밀도
- MR\_H : MRF의 자기장 세기

## 3.2 DOE 수행

설계변수가 출력에 미치는 영향과 변수간의 경향성을 보기 위해 Full-Factorial 방법을 이용한 실험계획법(DOE) 수행

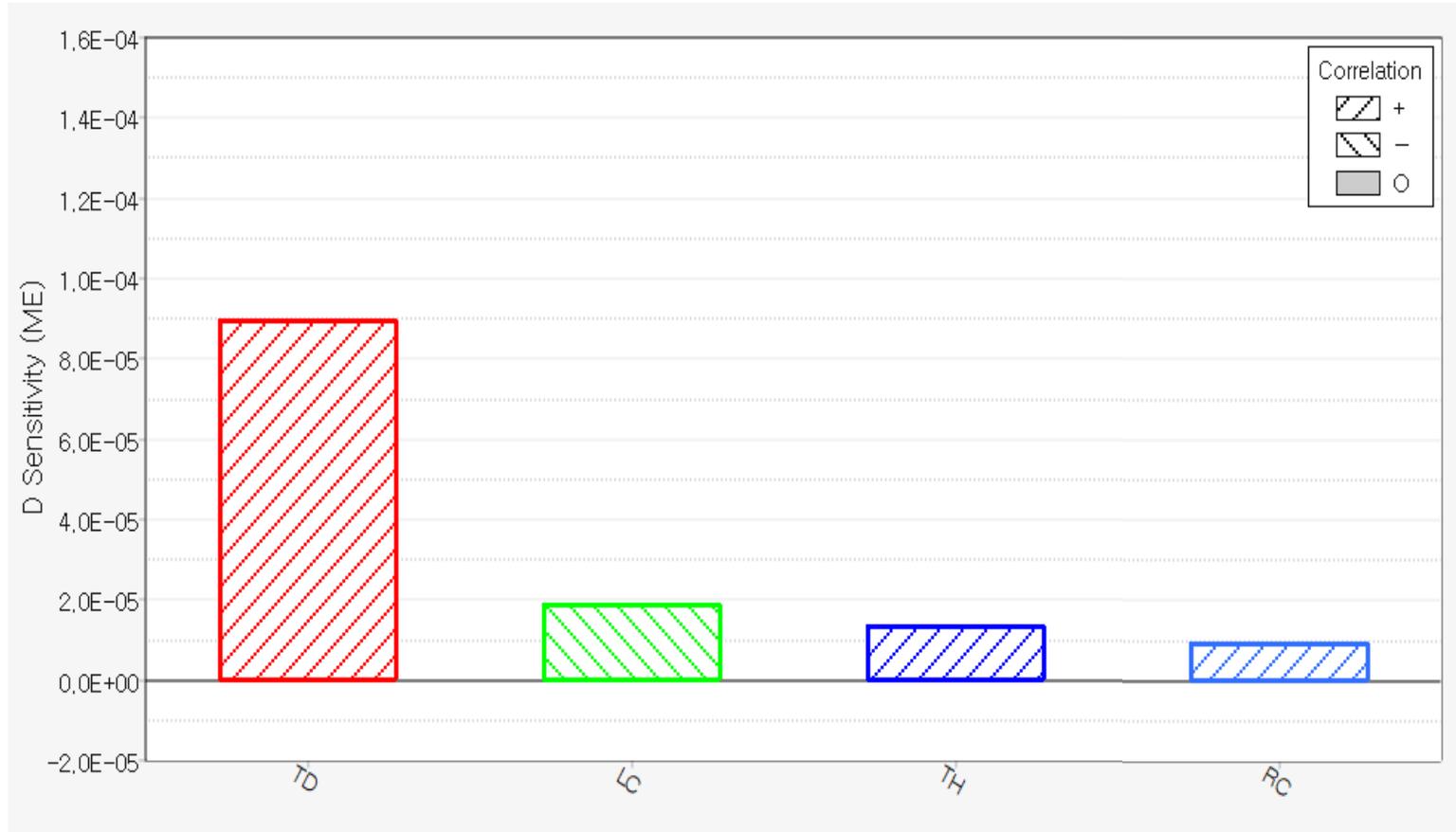
$$\text{Runs} = 4! = 24$$

	LC	RC	TD	TH	D	DPVIS	DPY	MR_B	MR_H
13	22.760800	13.668000	1.0160000	5.4088896	1.26e-04	8788.5174	1.1080997	1.71e-05	8.1600101
14	23.680800	14.868000	0.9160000	4.6092352	1.01e-04	10812.150	1.0906959	1.56e-05	7.5486331
15	21.104800	13.908000	0.8960000	4.8482673	1.03e-04	11300.223	1.1607923	1.60e-05	7.7491625
16	23.864800	14.508000	1.0960000	4.4498805	1.36e-04	7552.3466	1.0236432	1.73e-05	8.1414912
17	21.288800	13.548000	1.0760000	4.6883365	1.40e-04	7835.7125	1.0983618	1.79e-05	8.4224530
18	22.208800	14.748000	0.9760000	5.8886821	1.25e-04	9523.6494	1.1862396	1.71e-05	8.3102198
19	24.968800	15.348000	1.1760000	5.4891431	1.58e-04	6559.7666	1.0339076	1.82e-05	8.5798336
20	22.392800	14.388000	1.1560000	5.7287513	1.61e-04	6788.7117	1.0922424	1.87e-05	8.7935457
21	24.232800	13.788000	0.9560000	4.1288665	9.23e-05	9926.2966	0.9165064	1.47e-05	6.9294626
22	25.152800	14.988000	0.8560000	5.3297883	9.18e-05	12380.993	1.1364515	1.49e-05	7.4185930
23	21.693600	13.956000	0.7720000	5.5363157	7.64e-05	15221.885	1.1624308	1.42e-05	7.0384119
24	24.453600	14.556000	0.9720000	5.1364886	1.15e-04	9602.1947	1.1007629	1.63e-05	7.8935606

- DPVIS : 점성에 의한 압력강하
- DPY : 자기장에 의한 압력강하
- MR\_B : MRF의 자속밀도
- MR\_H : MRF의 자기장 세기

## 3.2 DOE 수행

### ❖ 민감도 분석



민감도 분석 결과 TD가 동적범위에 가장 큰 영향

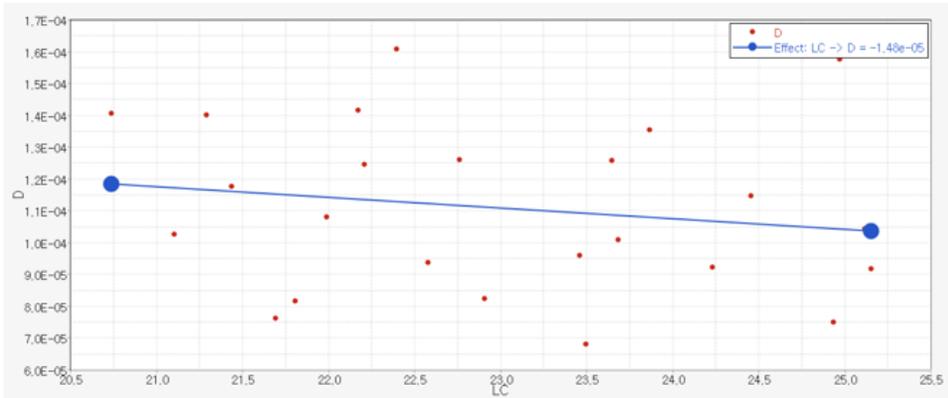


주요 설계인자 = TD

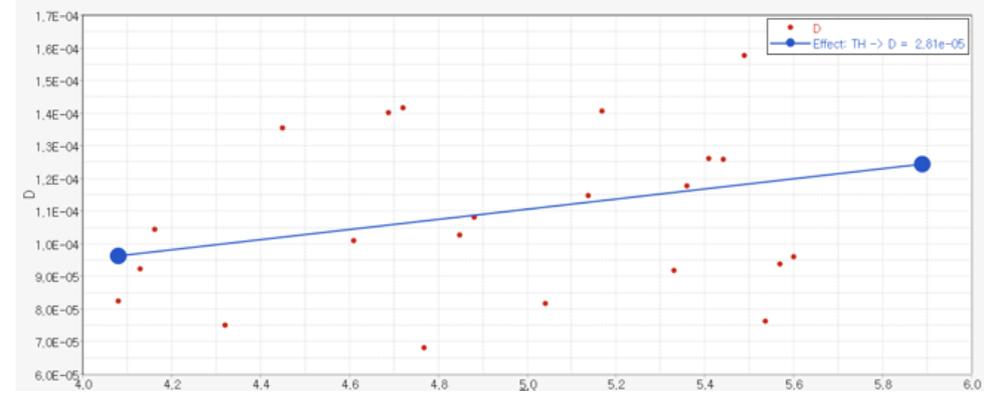
## 3.2 DOE 수행

- ❖ Linear Effect 확인 설계인자에 따른 결과 변화 경향성  
=> TD값과 동적범위 D가 비례하는 경향성 확인

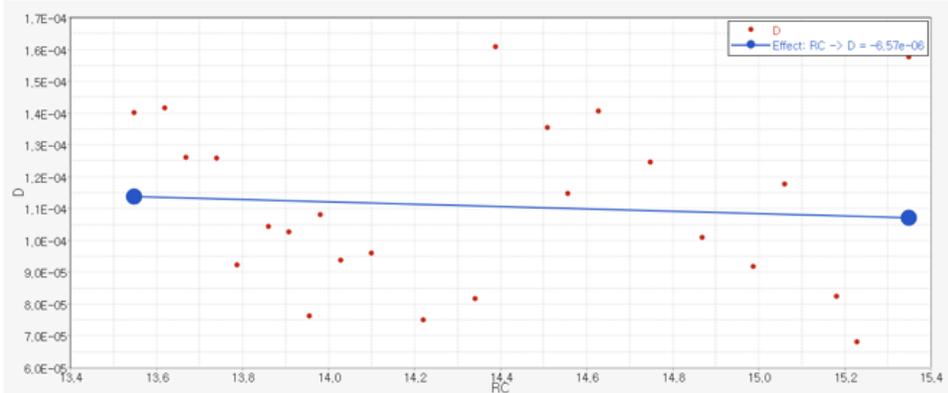
< LC >



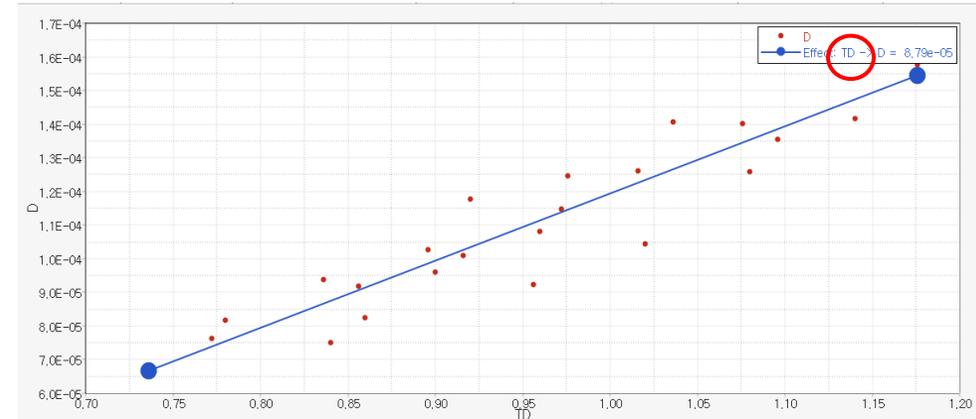
< TH >



< RC >

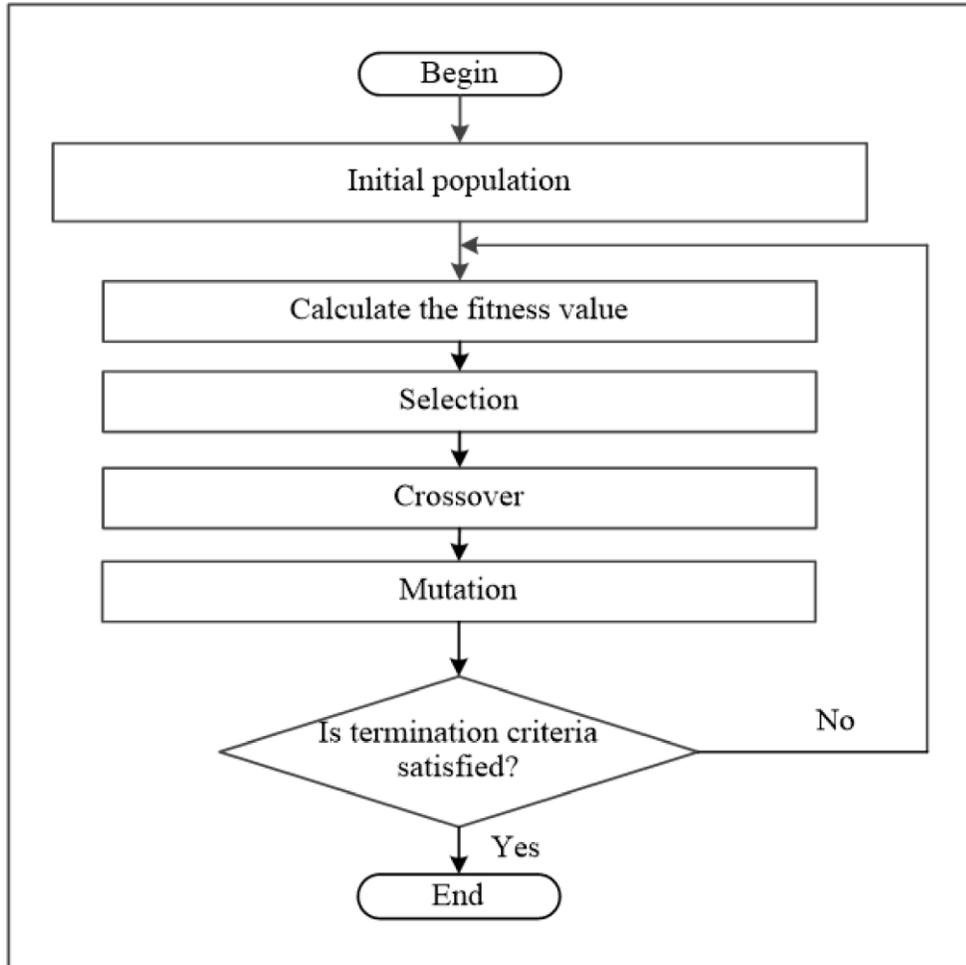


< TD >



## 3.3 GA 이용한 최적화

### ❖ Genetic Algorithm (유전 알고리즘, GA)



#### ▪ Genetic Algorithm

생물의 진화원리를 모방하여 최적 해를 찾는 전역 최적화 기법  
다양한 해 중에서 더 나은 해를 세대별로 진화시키는 방식으로 최적화 수행

- 본 프로젝트의 해석 대상은 복잡한 FEM 기반 모델이므로 미분 정보가 없고 제약조건이 여럿 존재함

=> 패널티 기반 전역 최적화가 가능한 GA를 사용

# 3.3 GA 이용한 최적화

## ❖ 최적화 결과

	LC	RC	TD	TH	D	MR_H	F	Goal 1	Goal 2
1	23.000000	15.000000	0.7000000	5.0000000	0.0634595	6.6492802	1628.7050	0.0634595	Feasible
2	23.644000	13.740000	1.0800000	5.4399539	0.1291996	7.9671450	1055.7115	0.1291996	Feasible
3	21.988000	13.980000	0.9600000	4.8804840	0.1080298	7.6556441	1187.6503	0.1080298	Feasible
4	25.116000	13.860000	1.0200000	4.1616593	0.1044839	7.2005299	1117.7845	0.1044839	Feasible
5	21.141600	15.036000	0.7320000	4.0159643	0.0603154	6.2478069	1557.4999	0.0603154	Feasible
6	24.896616	13.612872	1.1916524	5.6547331	0.1461213	8.0964858	956.81235	0.1461213	Violated
7	23.533308	13.913439	0.9994620	4.0213836	0.1004690	7.1126059	1140.7494	0.1004690	Feasible
8	25.235879	13.774401	1.0672417	4.0384429	0.1078540	7.1372905	1068.3092	0.1078540	Feasible
9	21.268231	14.025726	0.9818205	5.6682300	0.1242668	8.2654747	1161.2742	0.1242668	Feasible
10	25.087965	13.898484	1.0059897	4.8369481	0.1046061	7.2712931	1133.3519	0.1046061	Feasible
11	21.669813	13.740000	0.7399966	4.8369481	0.0680241	6.7097922	1540.6810	0.0680241	Feasible
12	23.376880	13.618914	1.1392773	5.4680038	0.1441764	8.2647513	1000.7972	0.1441764	Feasible
13	24.482808	13.754176	1.0760918	4.1641291	0.1149301	7.3992690	1059.5305	0.1149301	Feasible
14	23.844667	13.973204	0.9888821	4.2696570	0.1012735	7.1994703	1152.9550	0.1012735	Feasible
15	25.249521	13.761376	1.1790295	5.1262916	0.1316093	7.6154035	967.04214	0.1316093	Violated
16	25.144856	13.774818	1.0205784	4.0381721	0.0994933	6.9718001	1117.1455	0.0994933	Feasible
17	21.002346	15.053528	0.8764484	5.8455446	0.1114387	8.2901646	1300.8732	0.1114387	Feasible
18	21.496787	14.019993	0.9746583	5.0021310	0.1193203	8.0879584	1169.8020	0.1193203	Feasible
19	22.831775	13.568511	1.1962379	4.5125749	0.1590406	8.5349235	953.15690	0.1590406	Violated
20	21.212671	14.178726	0.7434716	5.6152323	0.0766733	7.2322797	1533.4930	0.0766733	Feasible
21	21.476777	13.597403	1.1972894	5.8144685	0.1698762	8.9046032	952.33017	0.1698762	Violated
22	23.553572	13.646406	1.1219272	4.9119038	0.1345909	7.9816728	1016.2643	0.1345909	Feasible

DOE 결과를 통한 설계 변수 최적화

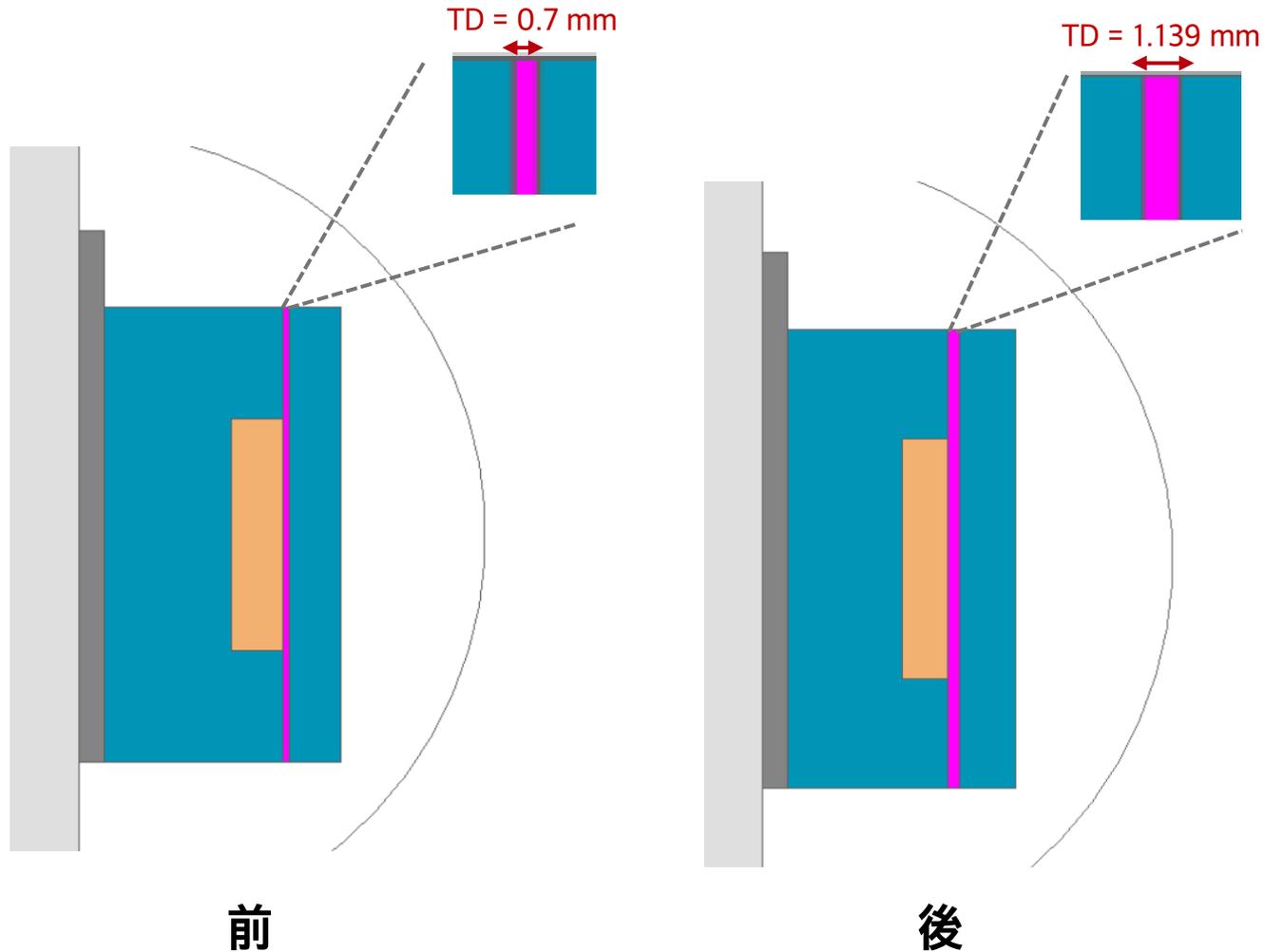
- ▷ Goal 1: D maximize
- ▷ Goal 2: F >= 1000N

최적값

LC : 23.377  
 RC : 13.619  
 TD : 1.139  
 TH : 5.468

# 3.3 GA 이용한 최적화

## ❖ 최적화 결과



	최적화 前	최적화 後
LC	23	23.377
RC	15	13.619
TD	0.7	1.139
TH	5	5.468

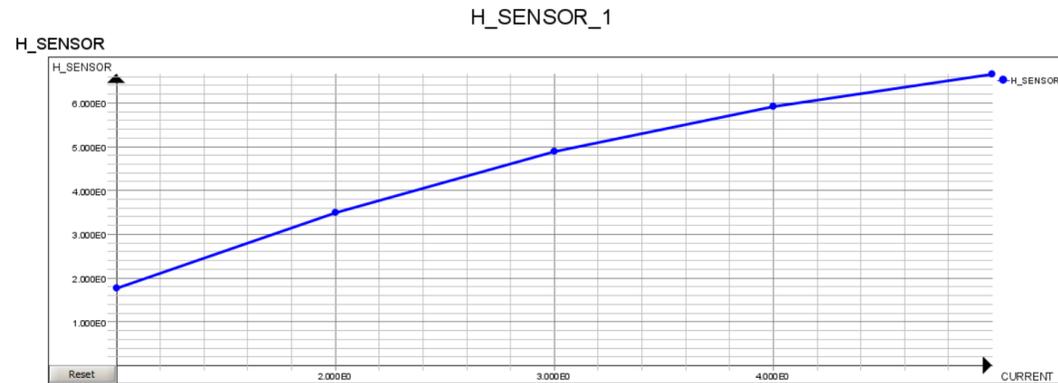
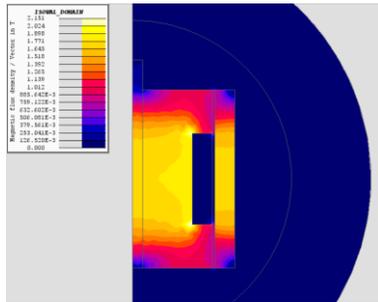
단위 : [mm]

- 주요 설계변수 유동 갭 너비(TD)값 약 62.71% 증가
- RC 값은 최적화 후 감소

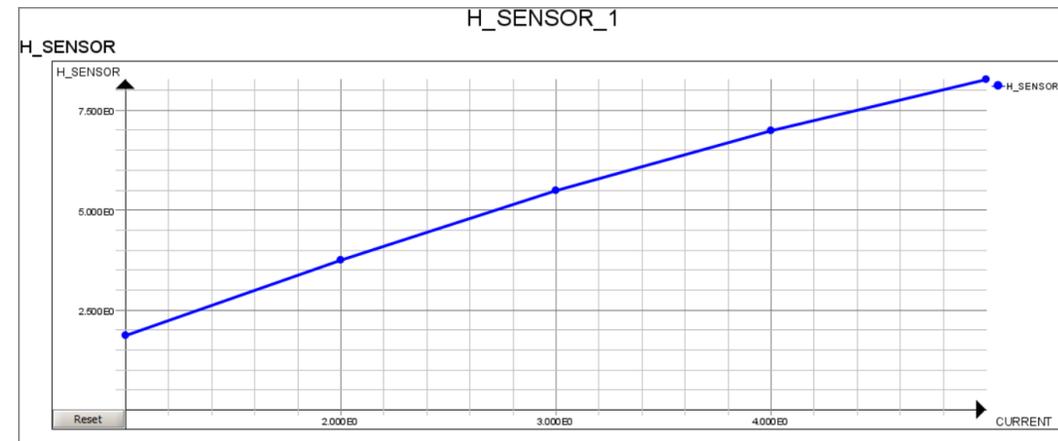
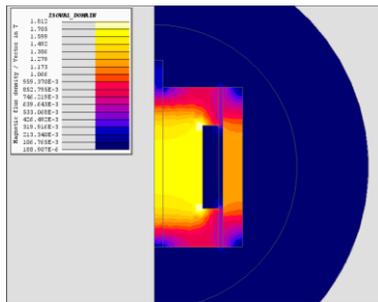
# 3.3 GA 이용한 최적화

## ❖ 최적화 결과

前



後



	최적화 前 H	최적화 後 H
1A	1.77359	1.85036
2A	3.49648	3.74080
3A	4.89331	5.48776
4A	5.91732	6.97811
5A	6.64928	8.26458

단위 : [A/m]

- 5A에서 H값 약 **24.89%** 향상

# IV. MATLAB을 이용한 결과 분석

# 4.1 MATLAB을 이용한 결과 분석

## ❖ 감쇠력 분석 개요



전체 감쇠력

$$F = F_{\eta} + F_{\tau}$$

자기장에 의한  
감쇠력

$$F_{\tau} = \Delta P_{yield} \cdot A_P = \Delta P_{yield} \cdot 2\pi R t_d$$

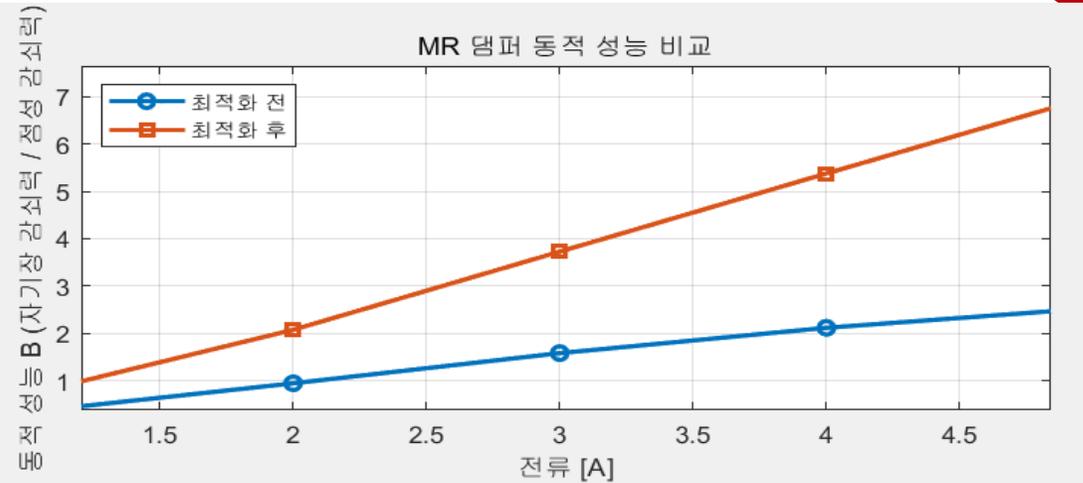
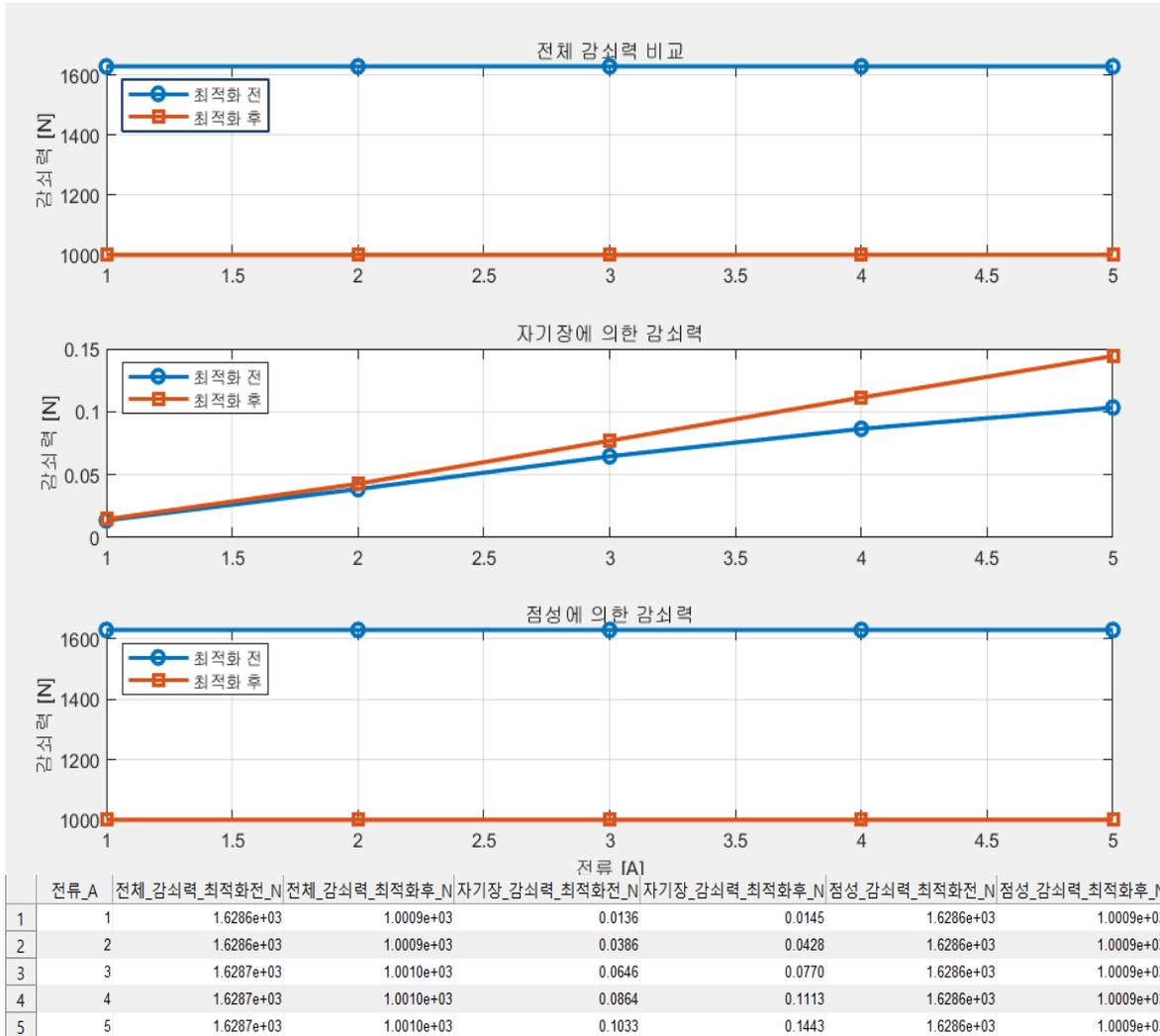
점성에 의한  
감쇠력

$$F_{\eta} = \Delta P_{vis} \cdot A_P = \Delta P_{vis} \cdot 2\pi R t_d$$

( 내부 피스톤 total 반지름 R은 20으로 고정 )

# 4.1 MATLAB을 이용한 결과 분석

## ❖ 감쇠력과 제어성능 분석



- 전체 감쇠력은 최저점으로 설정한 1000N으로 결정됨
- 자기장에 의한 감쇠력 증가
- 점성에 의한 감쇠력 감소
- 최적화 후 MR댐퍼의 제어 성능이 향상됨

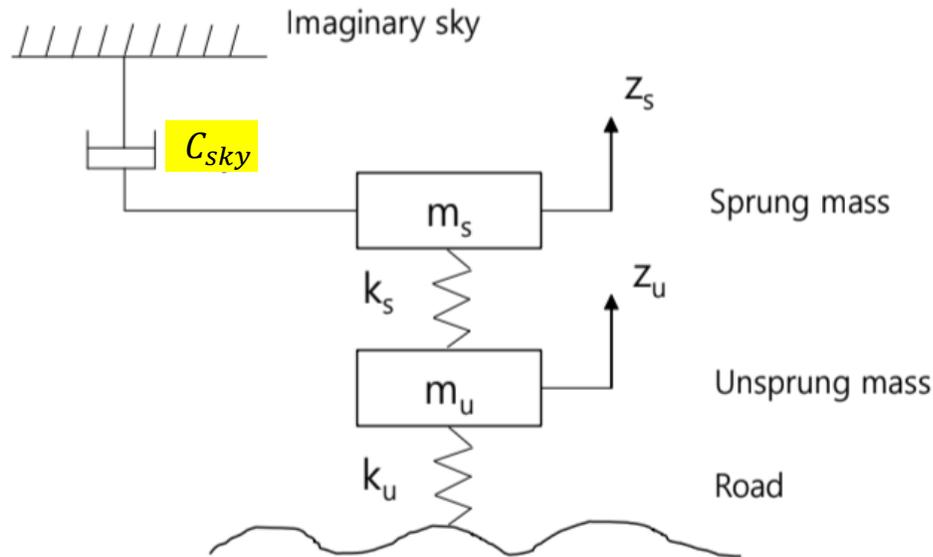
$$D = \frac{F_{\tau}}{F_{\eta}} = \frac{\Delta P_{yield} \cdot A_P}{\Delta P_{vis} \cdot A_P} = \frac{\Delta P_{yield}}{\Delta P_{vis}} \quad \Delta P_{yield} = \frac{\tau_y L}{t_d} \quad \Delta P_{vis} = \frac{12\mu L v}{t_d^2}$$

# 4.1 MATLAB을 이용한 결과 분석

## ❖ Sky Hook 제어 조건 기반 MR 댐퍼 감쇠력 특성 분석

< Sky hook control logic > [5]

- 가상의 하늘(Sky)에 차량을 고정시켜, 차체가 진동하지 않고 노면만 움직이게끔 제어하자는 개념에서 출발
- 전류 제어로 감쇠력 조절이 가능하기 때문에 MR댐퍼 실험에서 자주 쓰임



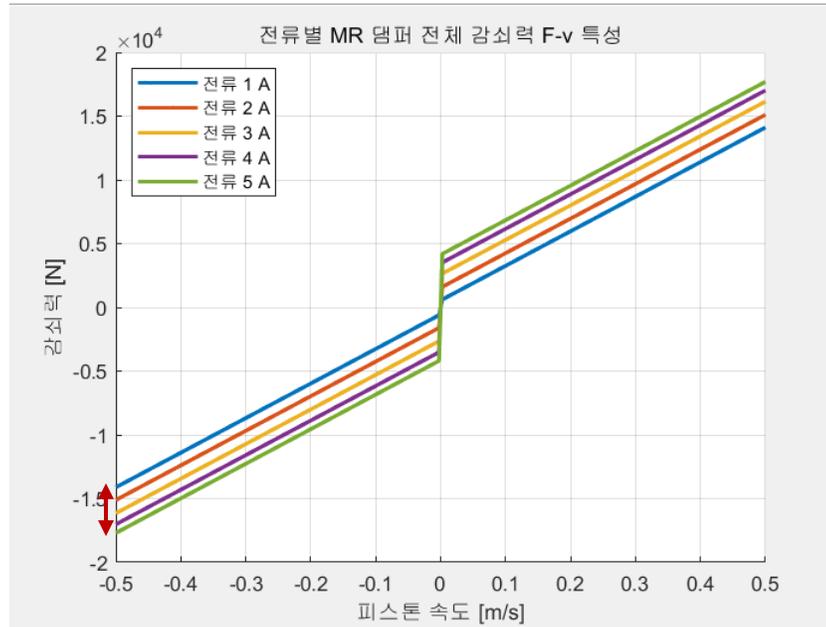
- 차량 흔들림 클 때 → 최대 감쇠력 적용 → 진동 억제
- 차량 흔들림 작을 때 → 최소 감쇠력 적용 → 승차감 유지

$$F_d = \begin{cases} F_{vis} + F_y(H_{max}), & \text{if } \dot{z}_s - \dot{z}_u > 0 \\ F_{vis} + F_y(H = 0), & \text{if } \dot{z}_s - \dot{z}_u < 0 \end{cases} \quad [4]$$

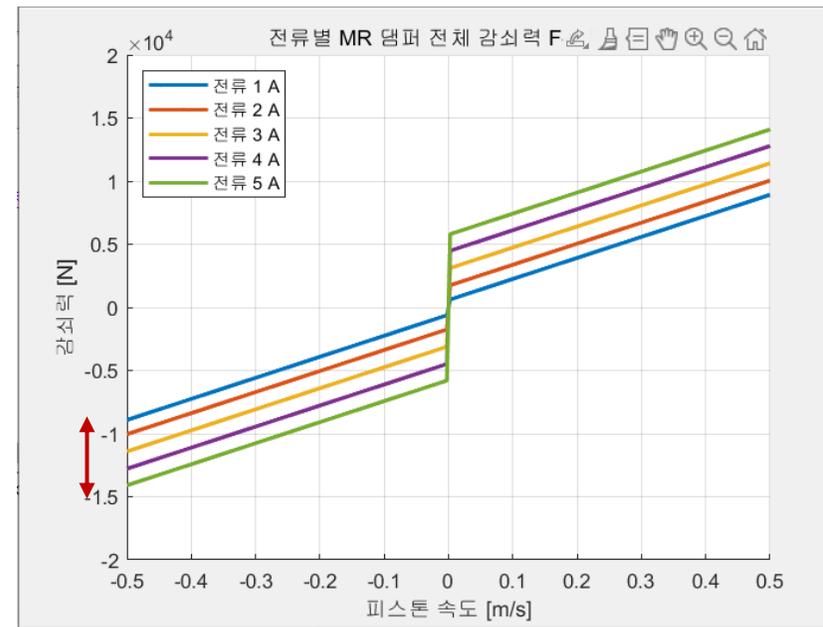
## 4.1 MATLAB을 이용한 결과 분석

### ❖ Sky Hook 제어 조건 기반 MR 댐퍼 감쇠력 특성 분석

< 최적화 전 >



< 최적화 후 >



- 최적화 이후 전류 변화에 따른 감쇠력의 차이 폭이 증가
- 최적화를 진행한 댐퍼가 보다 좋은 제어성능을 가졌음을 보여줌

# IV. 결론

## 4.1 결론

- 선행 연구에서는 유로가 제어성능에 미치는 영향에 집중하지 않음
- MR댐퍼의 제어성능은 자기장 세기(H)값에 좌우됨
- 댐퍼의 동적범위를 최대화 하는 것을 목적함수로 설정
- 운전자의 주행안정성을 위한 최소한의 감쇠력을 유지하는 것을 제한 조건으로 설정
- Full-Factorial 방법을 이용한 DOE 진행 후 Genetic Algorithm을 활용한 최적화 진행
- 최적화를 통해 기존 모델 대비 유로에서의 자기장 세기 값이 24.89% 향상된 모델을 생성
- Sky hook control logic 을 활용해 생성된 최적 모델을 평가한 결과, 제어 성능이 보다 향상되었음을 확인

- [1] 정병보, 권순우, 김상화, 박영진, "자기 유변 유체를 이용한 반능동 감쇠기의 개발," 유변학, 제11권 제2호, pp. 105-111, 1999.
- [2] 이석현, MR 유체 특성 및 MR 댐퍼 전자기 유동해석, 석사학위논문, 선문대학교 일반대학원 기계공학과, 2015.
- [3] 하성훈, 성민상, 구오흥, 최승복, "MR 댐퍼의 최적설계 : 이론적 방법 및 유한요소 방법," 한국소음진동공학회논문집, 제19권 제11호, pp. 110 - 118, 2009.
- [4] 강경호, 박종덕, "MR댐퍼 솔레노이드 밸브의 자성체 재질특성에 따른 차량 거동 및 진동감쇠 효과에 대한 연구," 전기전자학회논문지, 제73권 제7호, pp. 1182-1189, 2024.
- [5] Gopala Rao, L. V. V., and S. Narayanan, "Control of response of a quarter-car vehicle model with optimal skyhook damper," International journal of vehicle autonomous systems, vol. 6, no. 3-4, pp. 396-418, 2008.

**감사합니다**