



TILT ROTOR ARM OPTIMAL DESIGN

:CONSIDERING COMBINED S-CURVE AND DISTURBANCE

2021041212 안태일
2022049416 최윤서
2023000682 정선호

목차

- 01** 주제 선정 동기
- 02** 팀 소개
- 03** COMSOL
- 04** SIMULINK
- 05** 결론 및 고찰

01 주제 선정 동기

01 주제 선정 동기



01

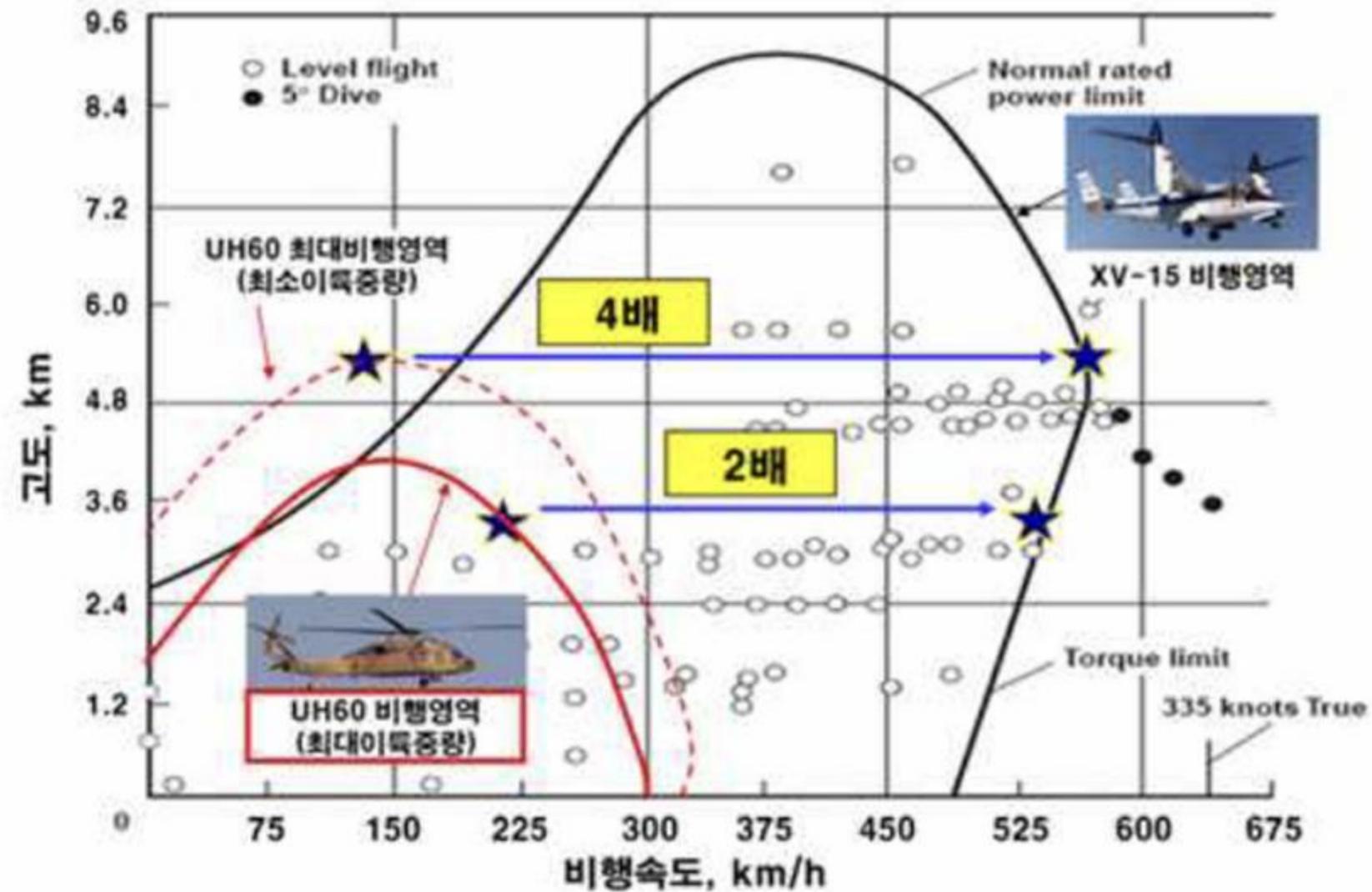
주제 선정 동기

틸트로터란?

헬리콥터처럼 수직 이착륙이 가능하면서도
비행 중에는 프로펠러(로터)를
앞으로 기울여 고속 비행기처럼 날 수 있는
항공기이다.

01

주제 선정 동기



2배 이상의 고도, 2배 이상의 속도

01 주제 선정 동기



“틸팅시 모멘트 값”

하중을 고려하여,
틸트로터가 틸팅할 때
걸리는 모멘트 값을 계산한다.

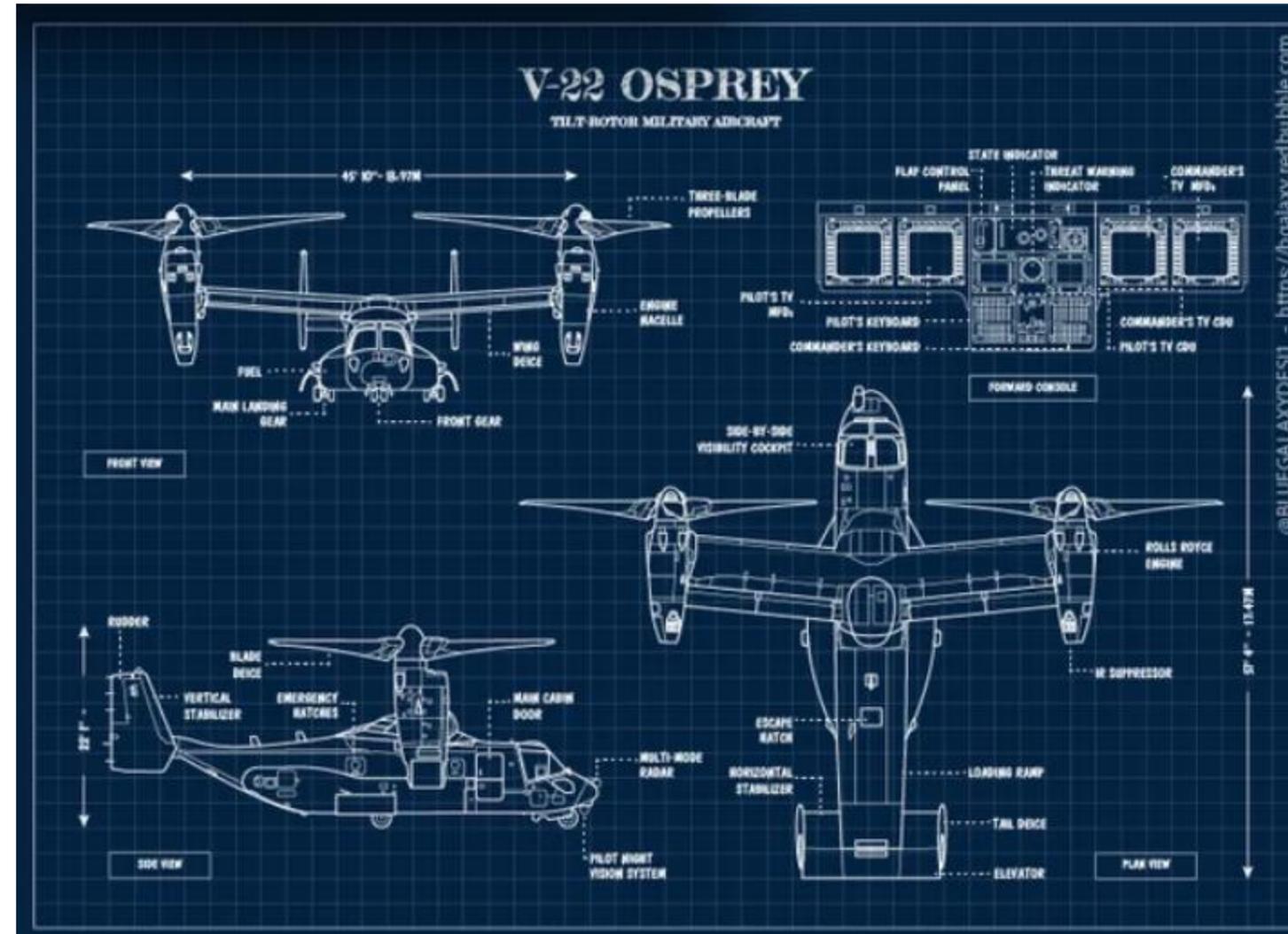


“최적의 제어”

이론 값을 바탕으로
최적의 PID 게인값을 설정하고,
COMSOL에서 계산한 모멘트 값을
대입하여 제어한다.

01

주제 선정 동기



V-22 OSPREY를 축소하여 모델링 하고자 한다.

02 팀 소개

02

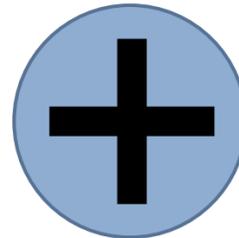
팀 소개

“최고의 안정”

02

팀 소개

“ 최_(윤서)고의 안_(태일)정_(선호) ”



“ 틸트로터의 안정적인 설계 ”

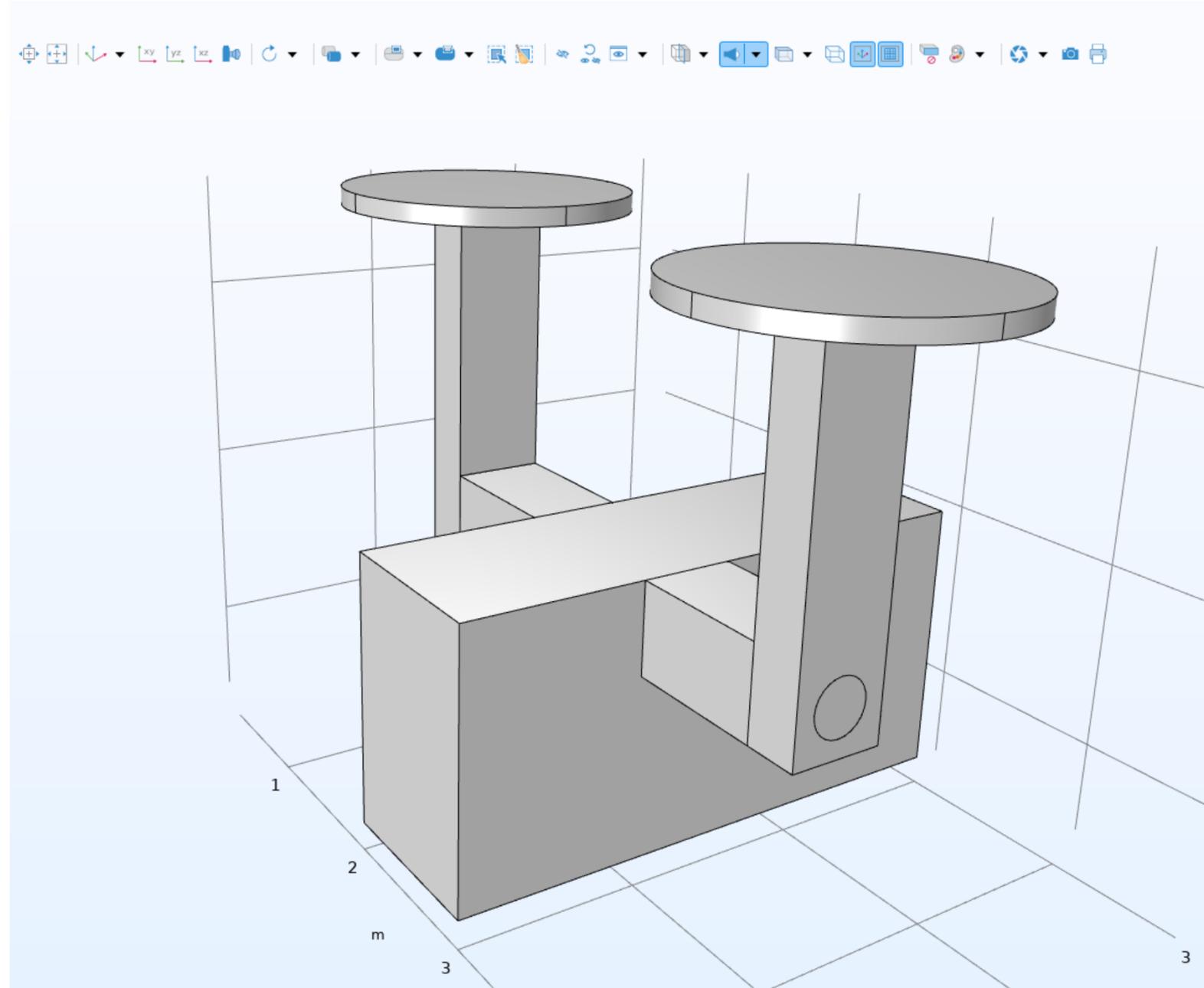
03 **COMSOL**

03

COMSOL

모델링

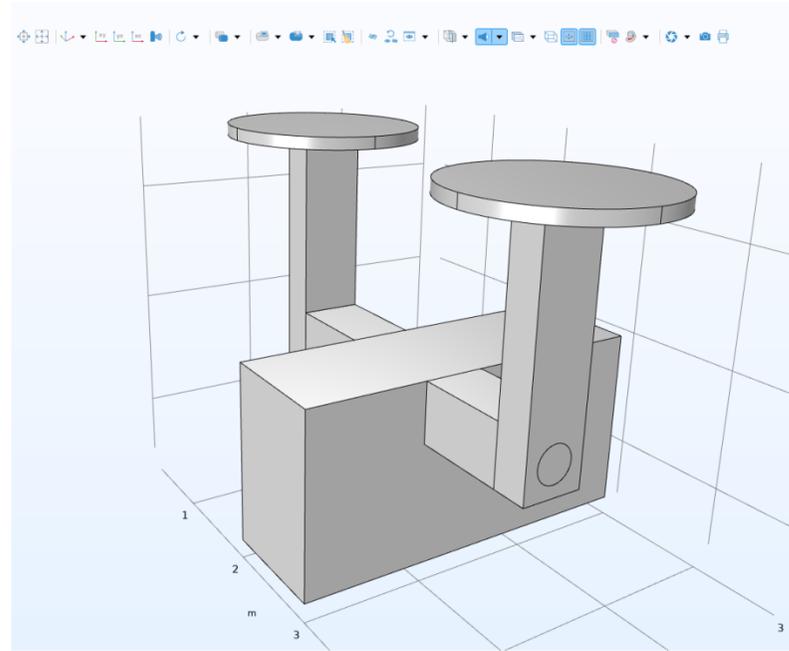
시뮬레이션 목적에
맞추어 기수, 미익,
랜딩기어 부분을 생략하되,
무게 중심 등 핵심 요소는
준수하여 간략화



03

COMSOL

모델링



나셀	길이
높이	2 (m)
가로	0.3 (m)
세로	0.5 (m)

03

COMSOL

Geometry

동체 = Body + Wing1,2

프로펠러 = Motor_Dummy

회전축 = 실린더 4

- Geometry 1
 - Wing (blk1)
 - Arm (blk2)
 - Motor_Dummy (cyl1)
 - Body (blk3)
 - Wing2 (blk4)
 - Arm2 (blk5)
 - Motor_Dummy2 (cyl2)
 - 실린더 3 (cyl3)
 - 차이 1 (dif1)
 - 실린더 4 (cyl4)
 - 차이 2 (dif2)
 - 실린더 5 (cyl5)
 - 합 2 (uni2)
 - 합 3 (uni3)
 - Form Assembly (fin)

03

COMSOL

Material

Aluminum 6061	
밀도	2,713 (kg/m ³)

항공기에 주로 쓰이는
듀랄루민과 비슷한
“6061 알루미늄”
을 주 소재로 선정.

- ▼ 재료
 - > 6061 [solid,T6 temper] (mat1)
 - ▼ Multibody Dynamics (mbd)
 - Linear Elastic Material 1
 - Free 1
 - Initial Values 1
 - Gravity 1
 - Fixed Constraint 1
 - > Rigid Material : Body
 - > Rigid Material : Wing
 - Rigid Material : Arm
 - Rigid Material : Motor_Dummy
 - Rigid Material : Motor_Dummy2
 - Attachment 1
 - Attachment 2
 - Attachment 3
 - Attachment 4
 - > Hinge Joint 1
 - > Hinge Joint 2
 - Boundary Load 1
 - > Hinge Joint 3
 - > Hinge Joint 4
 - Boundary Load 2
 - ▼ Mesh 1
 - Size
 - Free Tetrahedral 1

03

COMSOL

Parameters

t_arm = arm의 두께

thrust = 추력

Motor_dummy 법선 성분

T_end = 시뮬레이션 시간

(시뮬레이션 한계로 인하여 5초로 시행.)

매개변수

라벨: Parameters 1

매개변수

이름	표현식	값	설명
t_arm	0.3[m]	0.3 m	Thickness of Arm
thrust	23000[N]	23000 N	Thrust
T_end	5[s]	5 s	Analysing Time

03

COMSOL

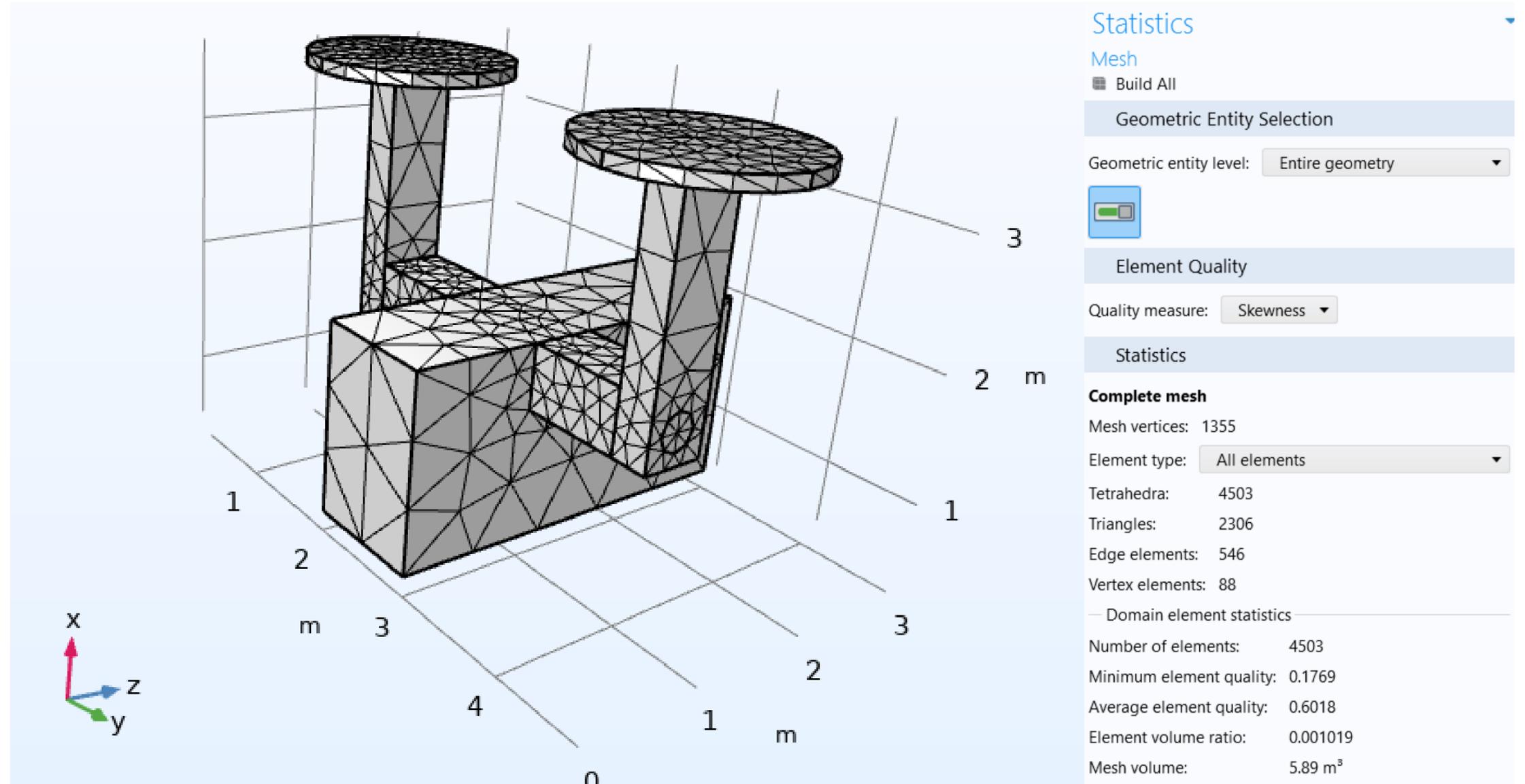
Mesh

Mesh

Tetrahedra : 4503

Triangles : 2306

Edge Elements : 546



03

COMSOL

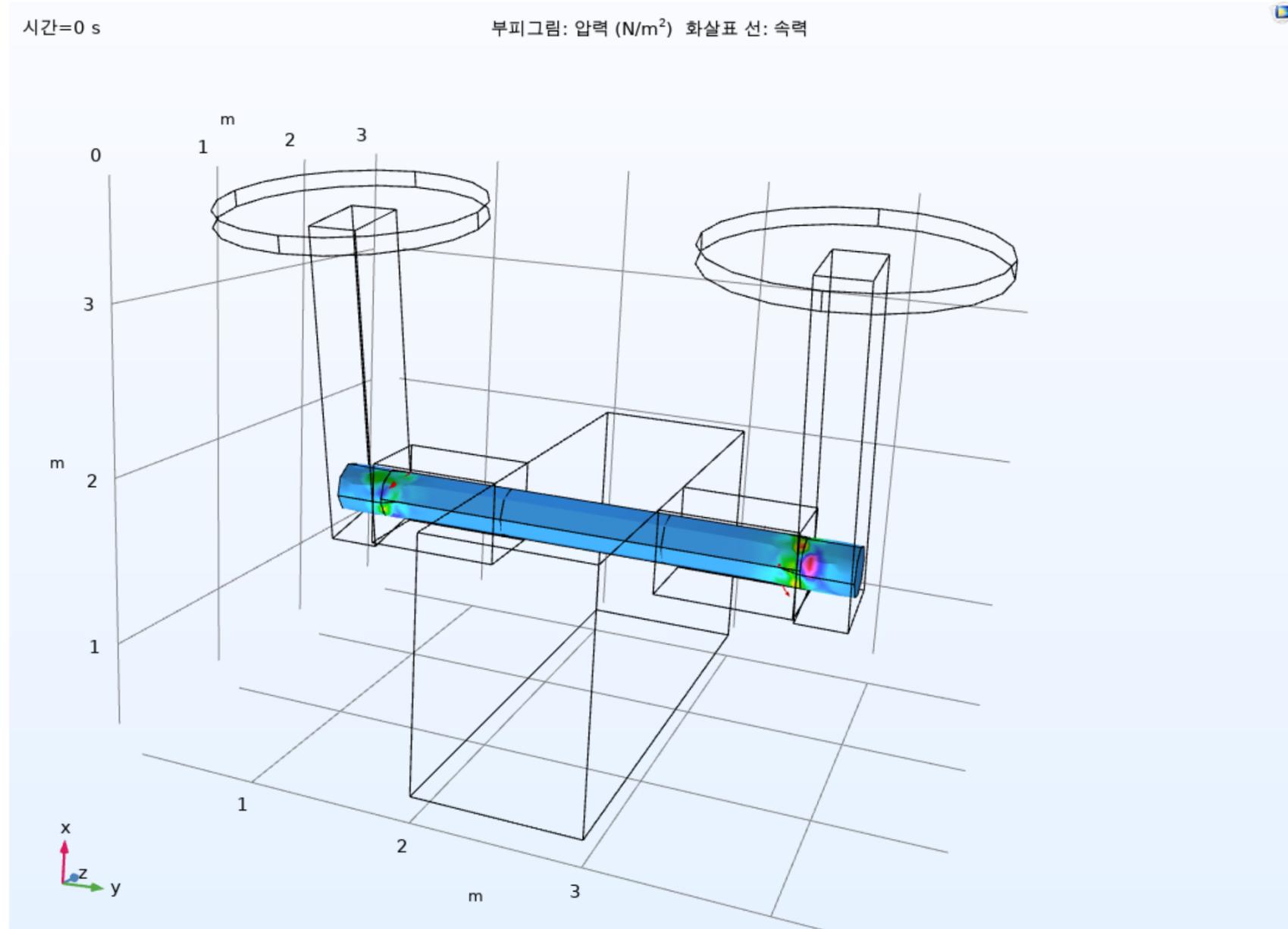
Total

- CAE Tiltrotor7.mph (root)
 - 글로벌 정의
 - Parameters 1
 - Default Model Inputs
 - Materials
 - Component 1 (comp1)
 - 정의
 - step_tilt (step_tilt)
 - Identity Boundary Pair 2 (ap2)
 - Identity Boundary Pair 6 (ap6)
 - 동일 경계 페어 7 (ap7)
 - Boundary System 1 (sys1)
 - View 1
 - Geometry 1
 - Wing (blk1)
 - Arm (blk2)
 - Motor_Dummy (cyl1)
 - Body (blk3)
 - Wing2 (blk4)
 - Arm2 (blk5)
 - Motor_Dummy2 (cyl2)
 - 실린더 3 (cyl3)
 - 차이 1 (dif1)
 - 실린더 4 (cyl4)
 - 차이 2 (dif2)
 - 실린더 5 (cyl5)
 - 합 2 (uni2)
 - 합 3 (uni3)
 - Form Assembly (fn)
 - 재료
 - 6061 [solid,T6 temper] (mat1)
 - Multibody Dynamics (mbd)
 - Mesh 1
 - Size
 - Free Tetrahedral 1
 - Study 1

03

COMSOL

Pressure



03

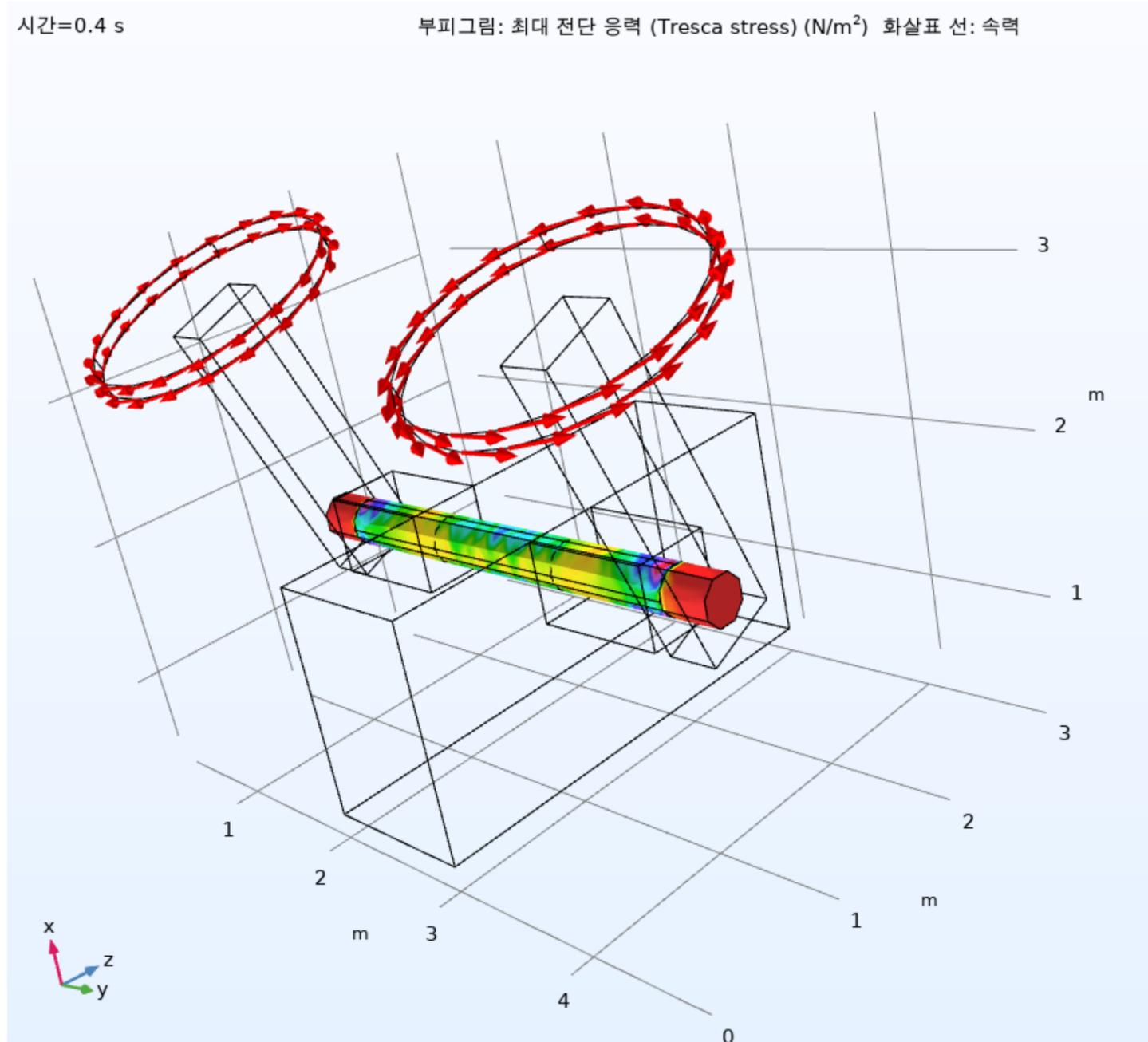
COMSOL

Stress

Tresca Stress

시간=0.4 s

부피그림: 최대 전단 응력 (Tresca stress) (N/m²) 화살표 선: 속력

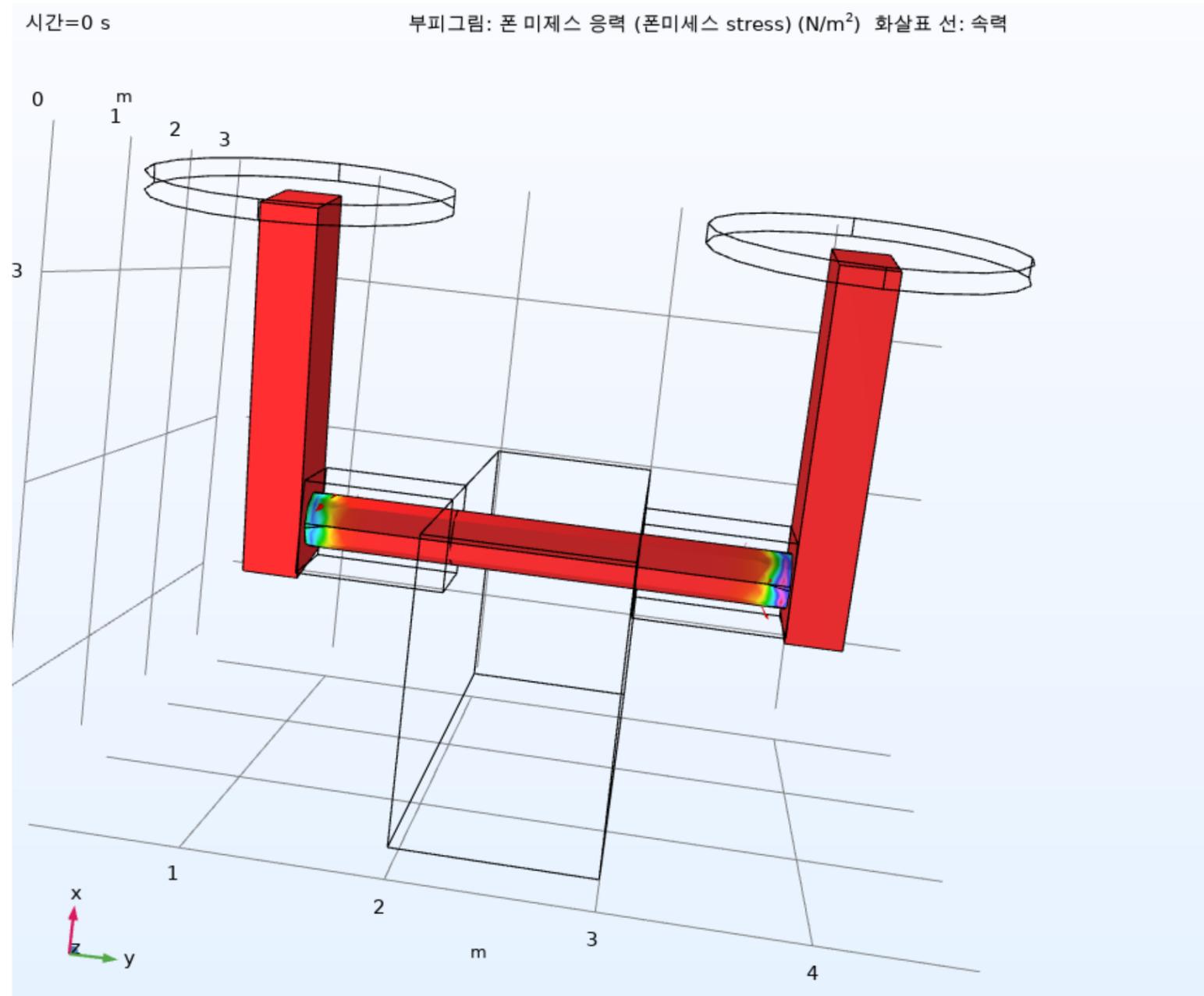


03

COMSOL

Stress

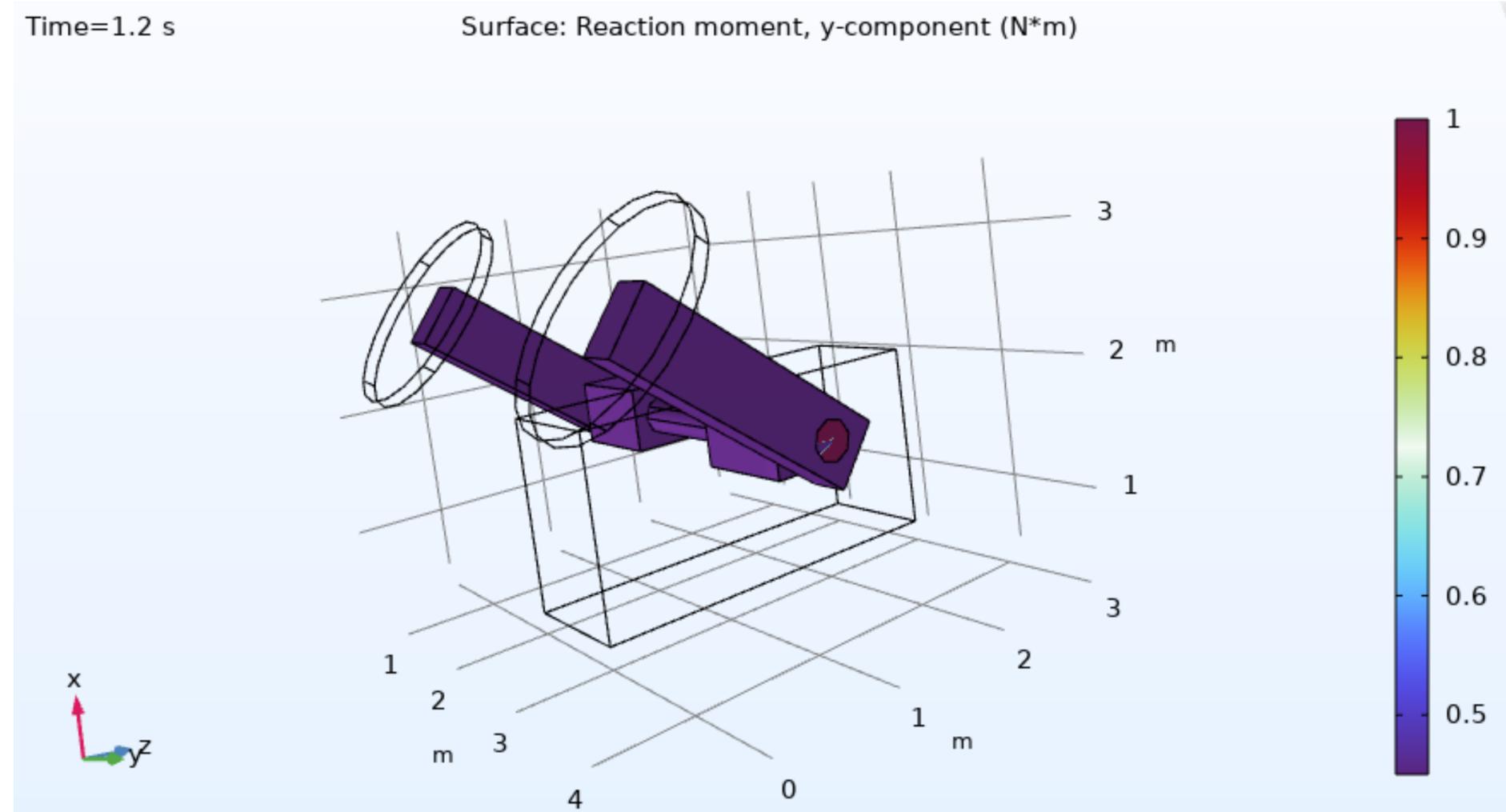
Von-Mises Stress



03

COMSOL

Moment



03

COMSOL

Result

시간(s)	값(Nm)
0.5	1.2727e5
1	1.0245e5
1.5	96293
2	1.0363e5
2.5	1.1132e5

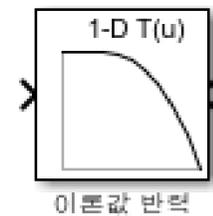
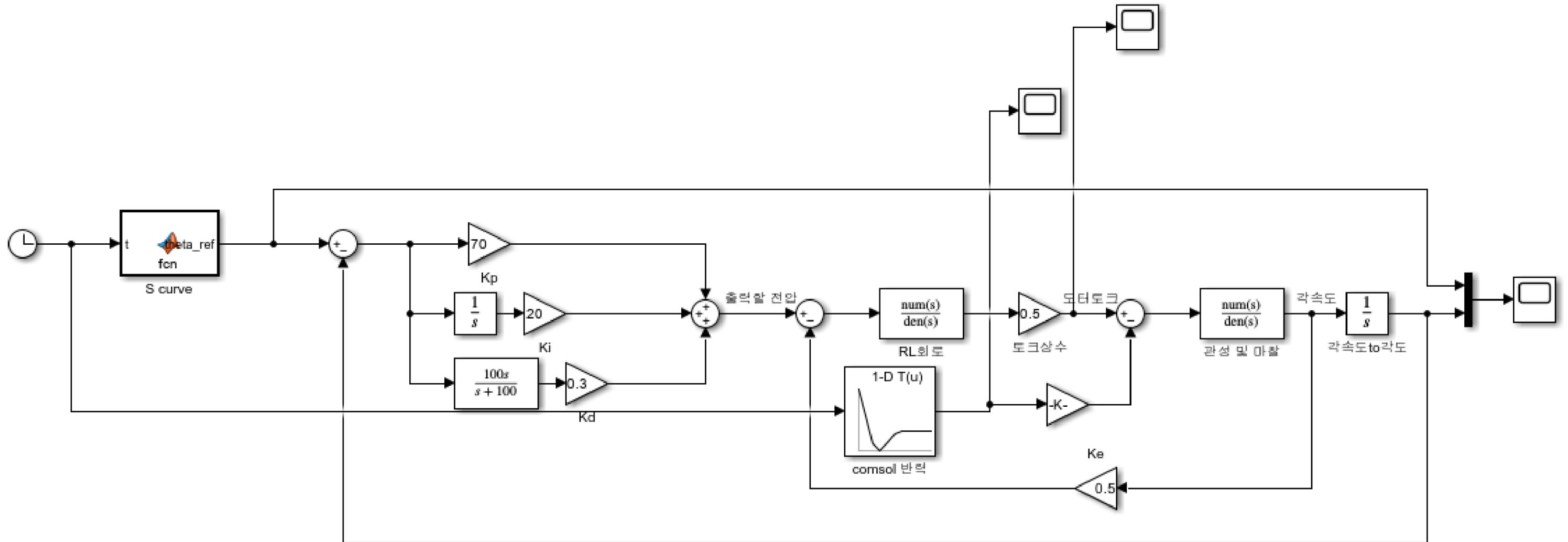
시간(s)	값(Nm)
3	1.1346e5
3.5	1.1347e5
4	1.1347e5
4.5	1.1347e5
5	1.1347e5

04

SIMULINK

04

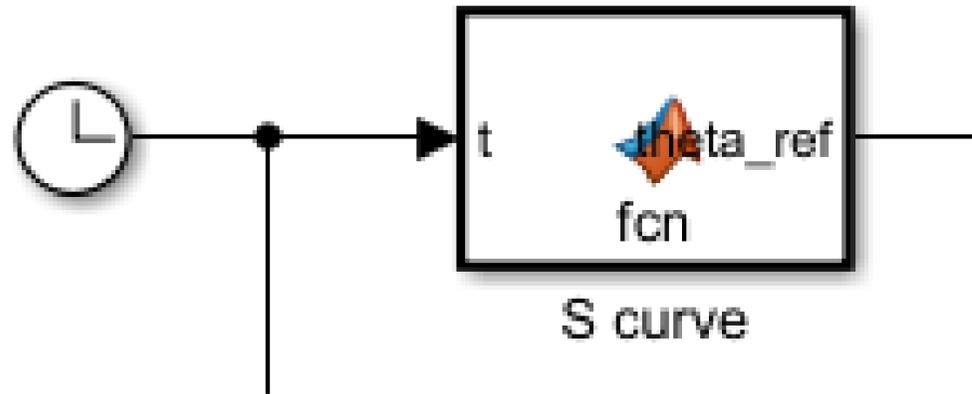
SIMULINK



04

SIMULINK

S curve
fcn block



ng ▶ S curve

```
function theta_ref = fcn(t)
    % 0초~10초 동안 0도에서 90도로 부드럽게 변하는 Sigmoid 함수
    % Target: 90도
    % Center Time: 5초 (중간 지점)
    % Slope: 1.5 (기울기, 클수록 급격함)

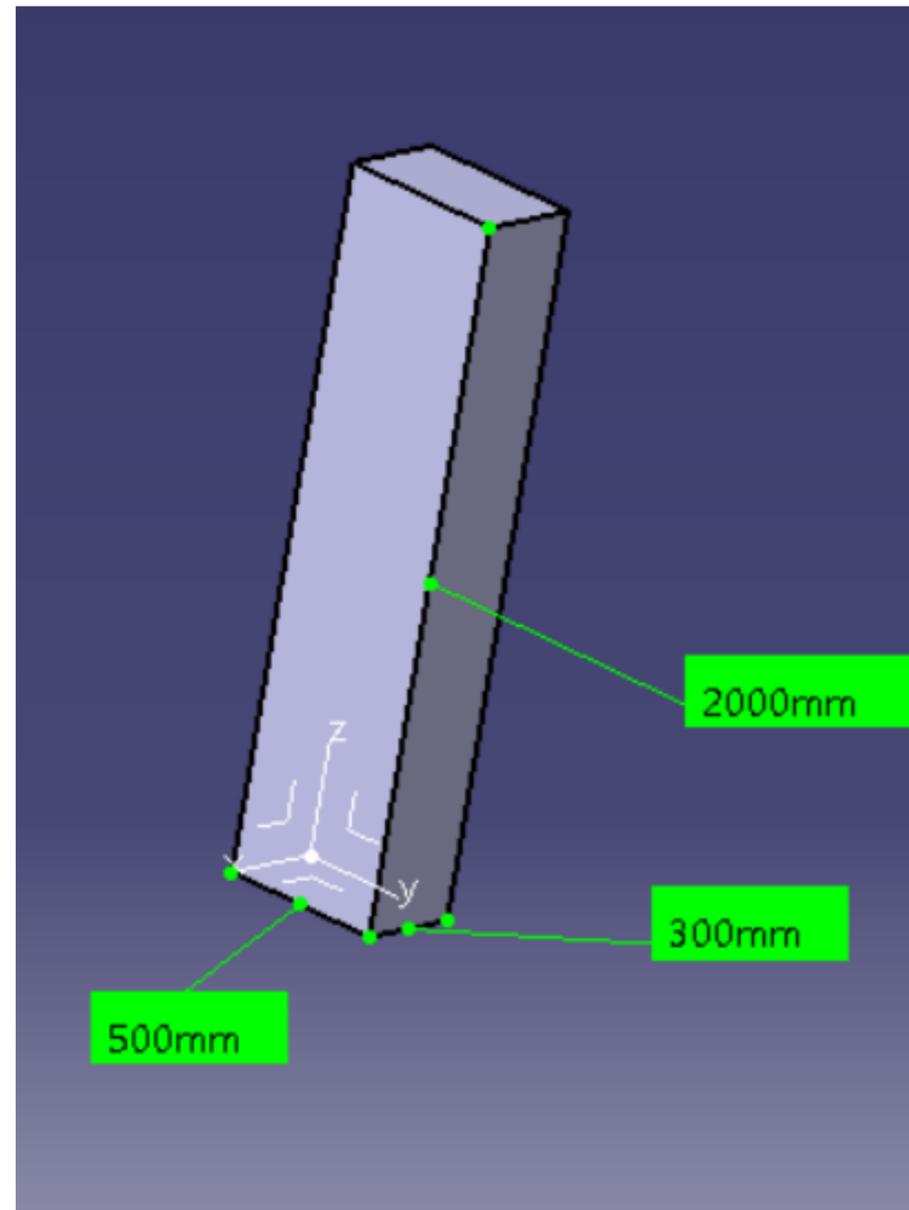
    Target_Angle = 90;
    t0 = 2.5;
    k = 1.5;

    % Sigmoid 수식
    theta_ref = Target_Angle / (1 + exp(-k * (t - t0)));
end
```

04

SIMULINK

이론값



높이	2 (m)
가로	0.3 (m)
세로	0.5 (m)
부피	0.3 (m ³)
밀도	2,713 (kg/m ³)
질량	813.9 (kg)

04

SIMULINK

이론값

5초에 90° 회전

- 각 가속도 (α)

$$\theta_f = \frac{1}{2} \alpha (t_f)^2, \therefore \alpha = \frac{2\theta_f}{t_f^2}$$

- 관성 모멘트 (I)

$$I_{CM} = \frac{1}{12} m (H^2 + L^2)$$

- 모멘트

$$\begin{aligned} M(t) &= M_\alpha + M_T(t) + M_{Air} \\ &= I\alpha + Td \cos \theta(t) + \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 da \end{aligned}$$

04

SIMULINK

이론값

```
1 function result = tilt_M(tf, T, rho, d)
2
3 H = 2.0;
4 W = 0.3;
5 L = 0.5;
6 theta_f = pi/2;
7 d_cm = W / 2;
8
9 Cd = 0.25;
10 rho_air = 1.2;
11 A = H * W;
12 v = 300 / 3.6;
13 d_a = 1.0;
14
15 V = H * W * L;
16 m = rho * V;
17
18 % 각가속도
19 alpha = (2 * theta_f) / (tf^2);
20
21 % 관성 모멘트
22 I_cm = (1/12) * m * (H^2 + L^2);
23 I = I_cm + m * d_cm^2;
24
25 % 각가속도 모멘트
26 M_alpha = I * alpha;
27
28 % 공기저항 모멘트
29 Fd = 0.5 * Cd * rho_air * A * v^2;
30 M_Air = Fd * d_a;
31
32 % 상수 모멘트 합
33 M_constant = M_alpha + M_Air;
34
35 t = 0:0.5:tf;
36 theta_t = 0.5 * alpha * t.^2;
```

```
46 % 최종 총 모멘트
47 M_t = M_constant + M_Thrust_t;
48
49 % 결과 출력
50 result = table(t, M_t, 'VariableNames', {'t', 'M_t'});
51
52
53 end
```

```
1 result = tilt_M(5, 23000, 2713, 1.75);
2
3 disp(result);
```

04

SIMULINK

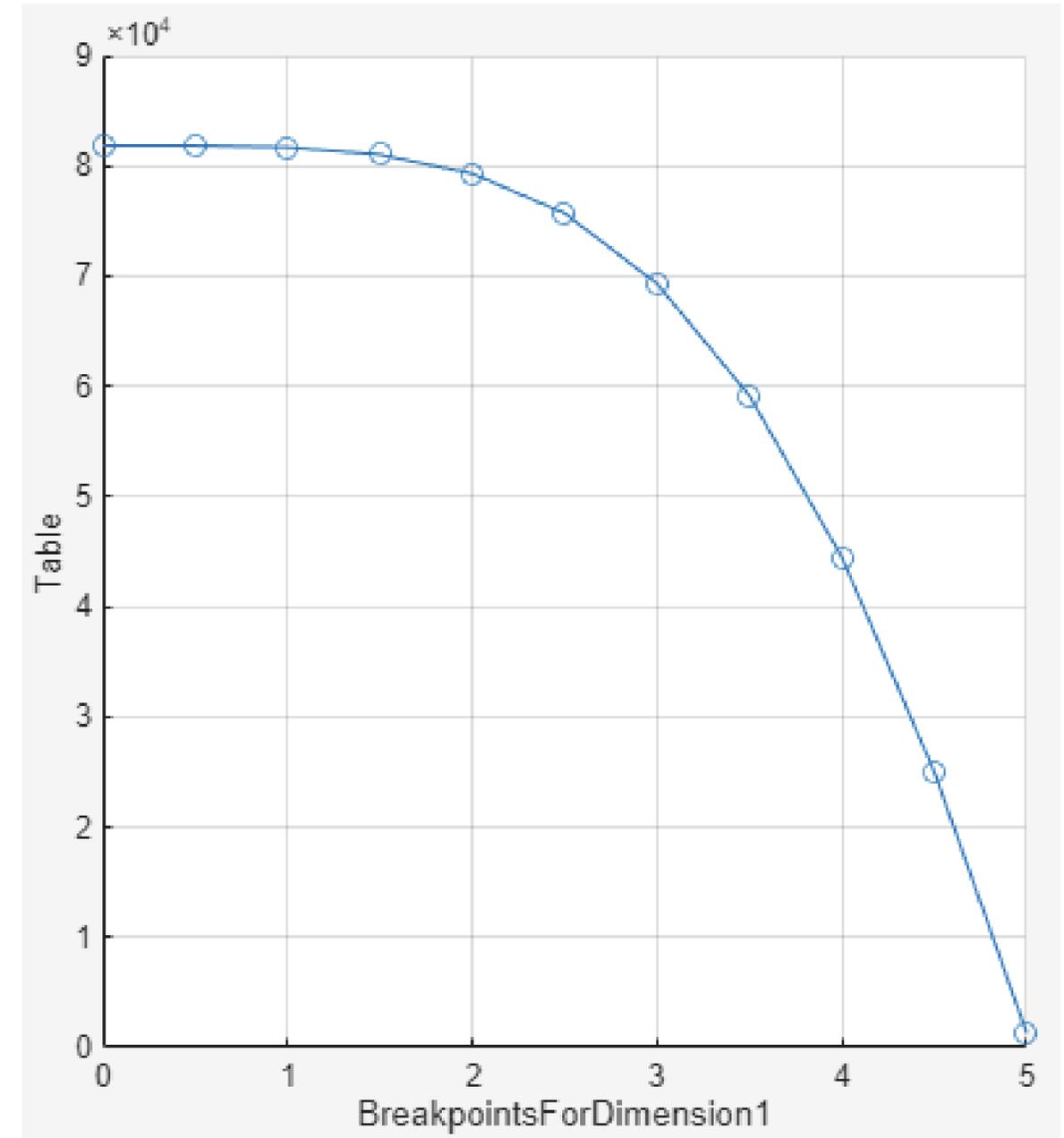
이론값

t	M_t
0	81164
0.5	81154
1	81005
1.5	80360
2	78634
2.5	75036
3	68632
3.5	58473
4	43798
4.5	24334
5	663.52

04

SIMULINK

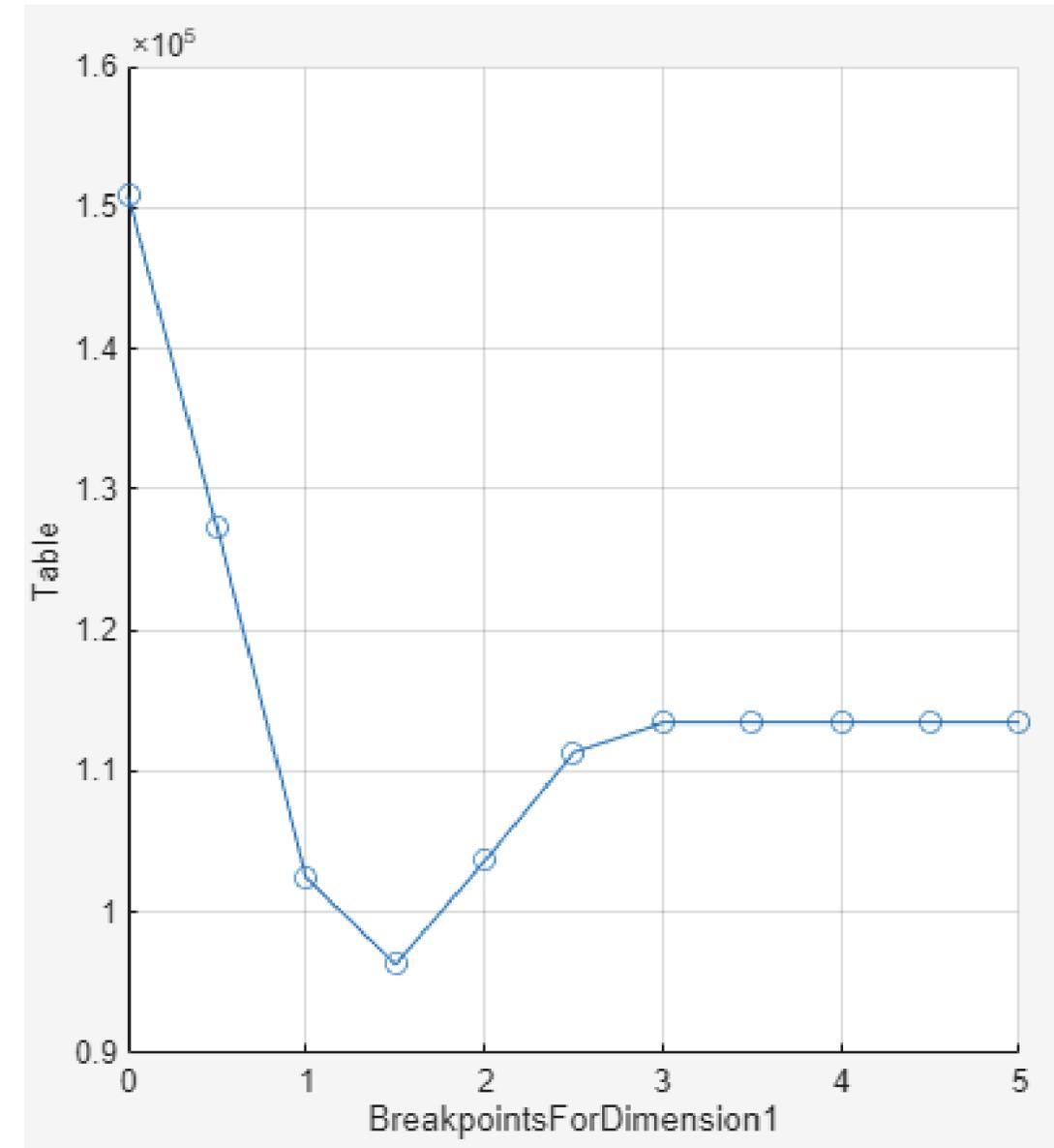
이론값



04

SIMULINK

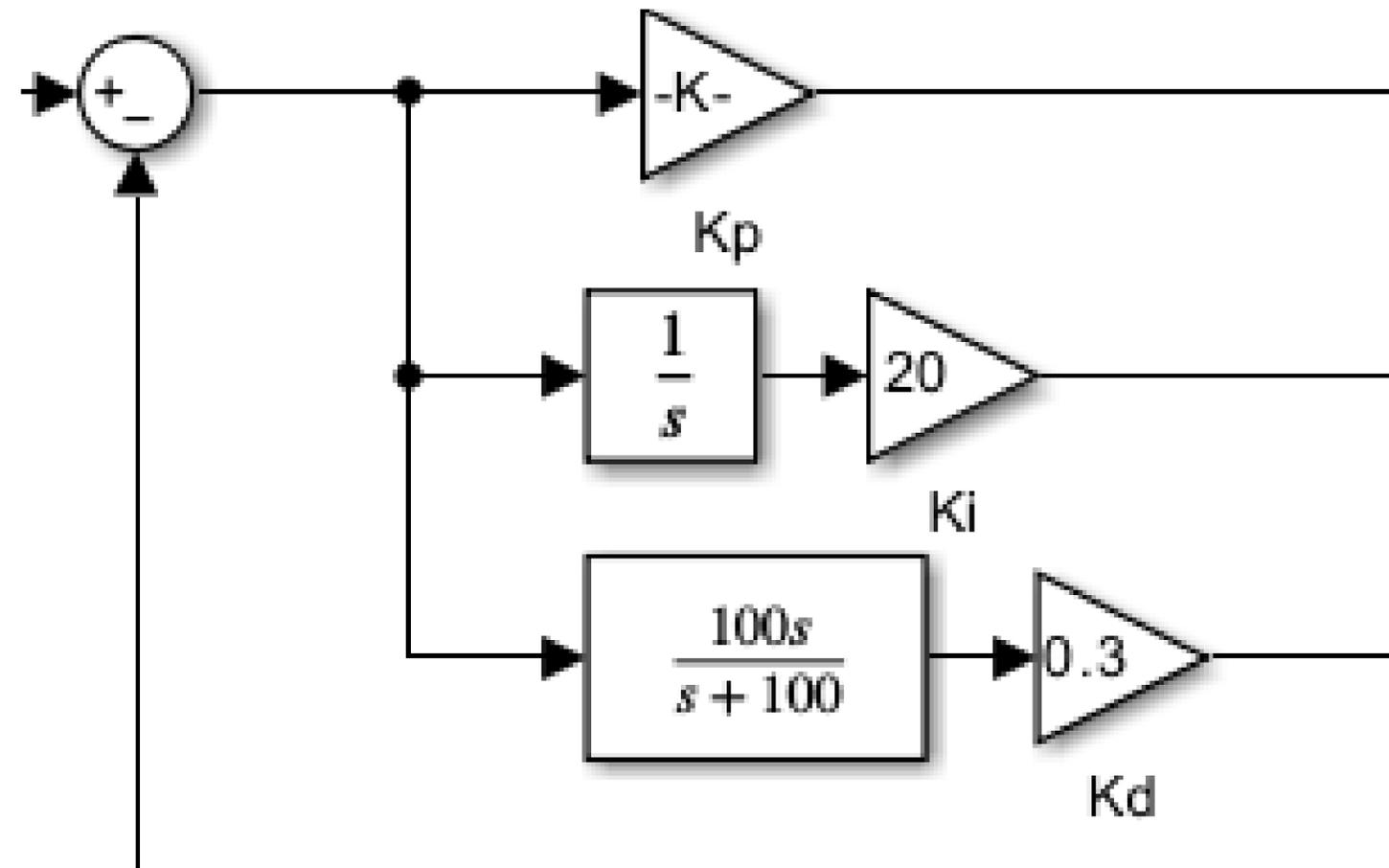
COMSOL값



04

SIMULINK

PID



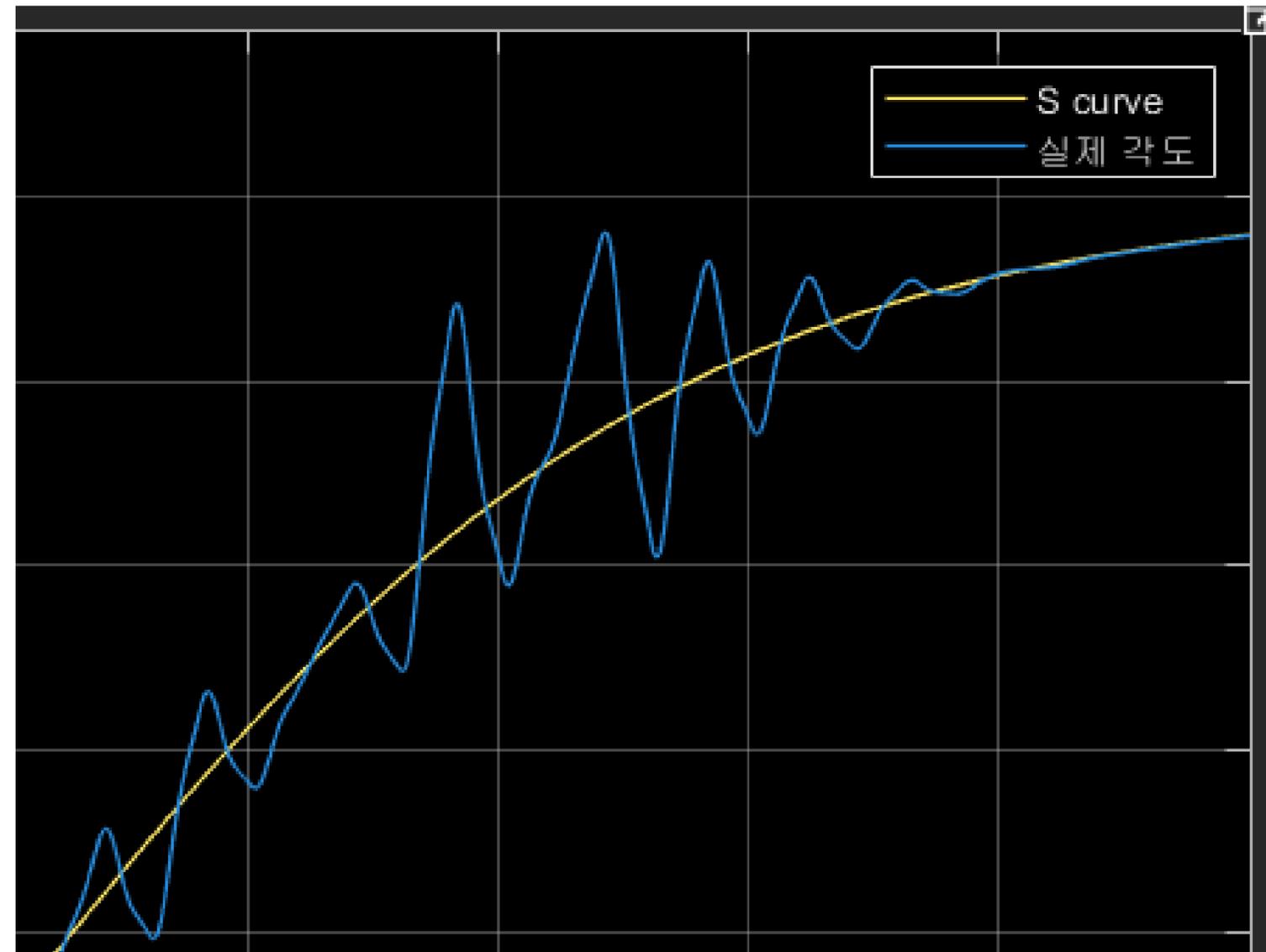
04

SIMULINK

PID

초기 P, I, D Gain을 0으로 설정

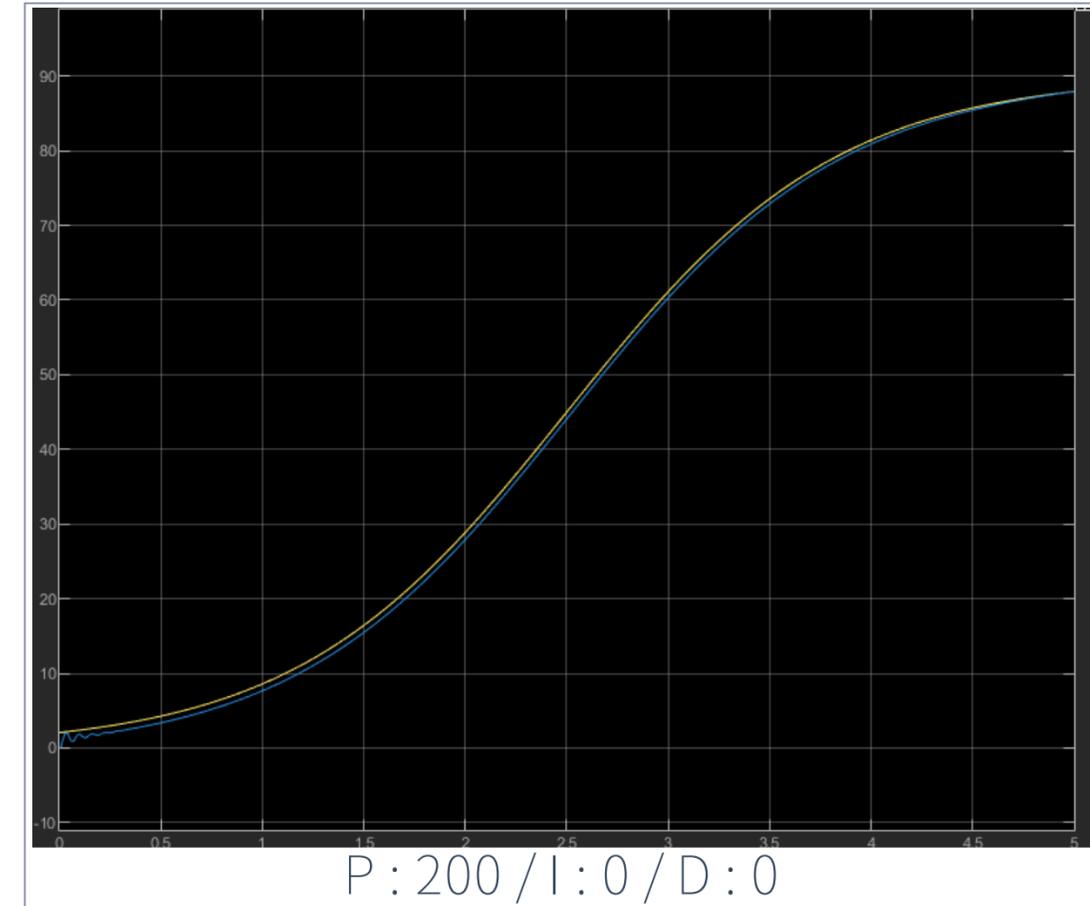
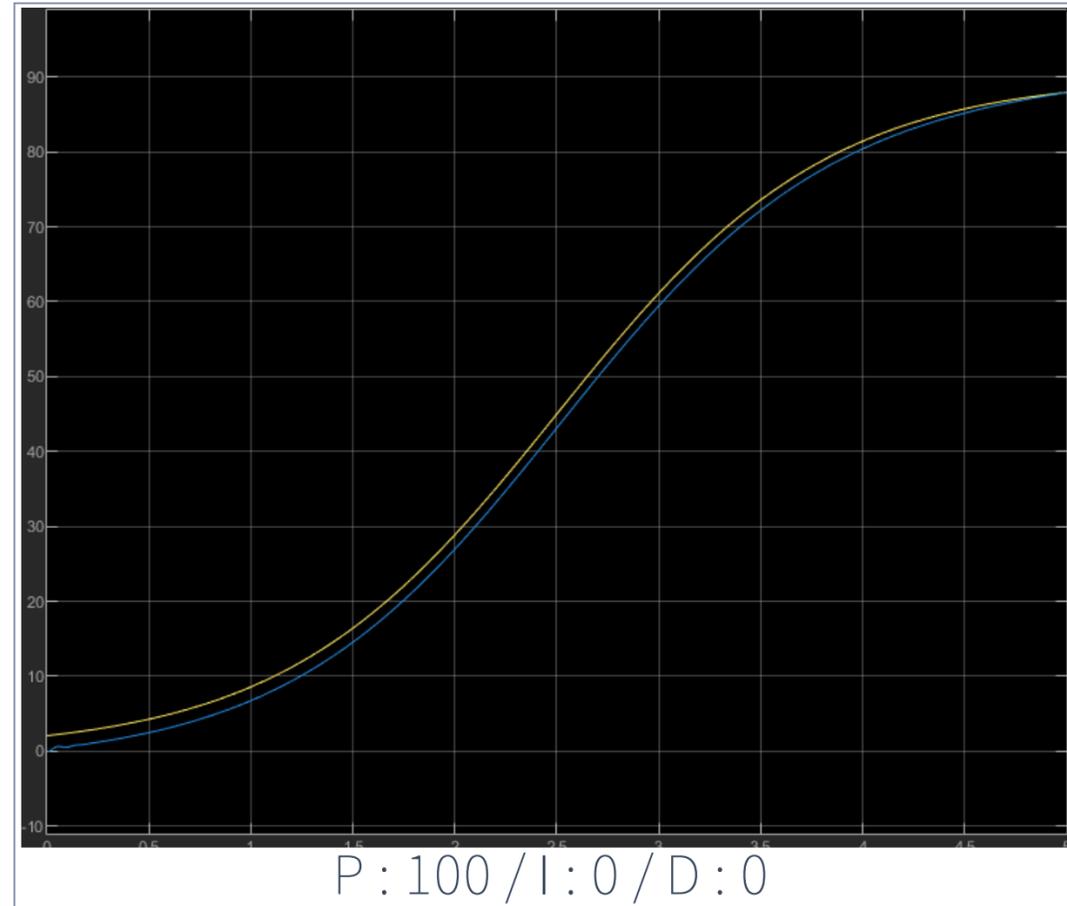
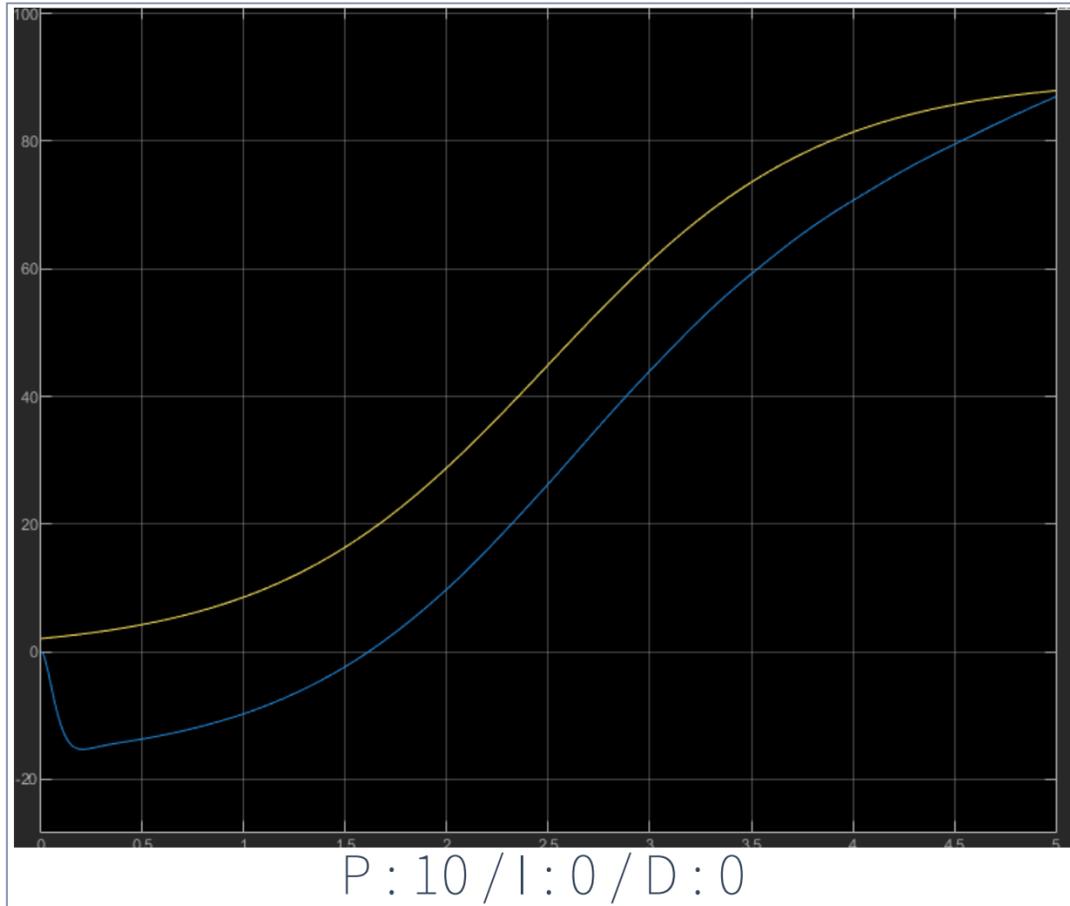
P → I → D 순서로 튜닝



04

SIMULINK

P값 결정

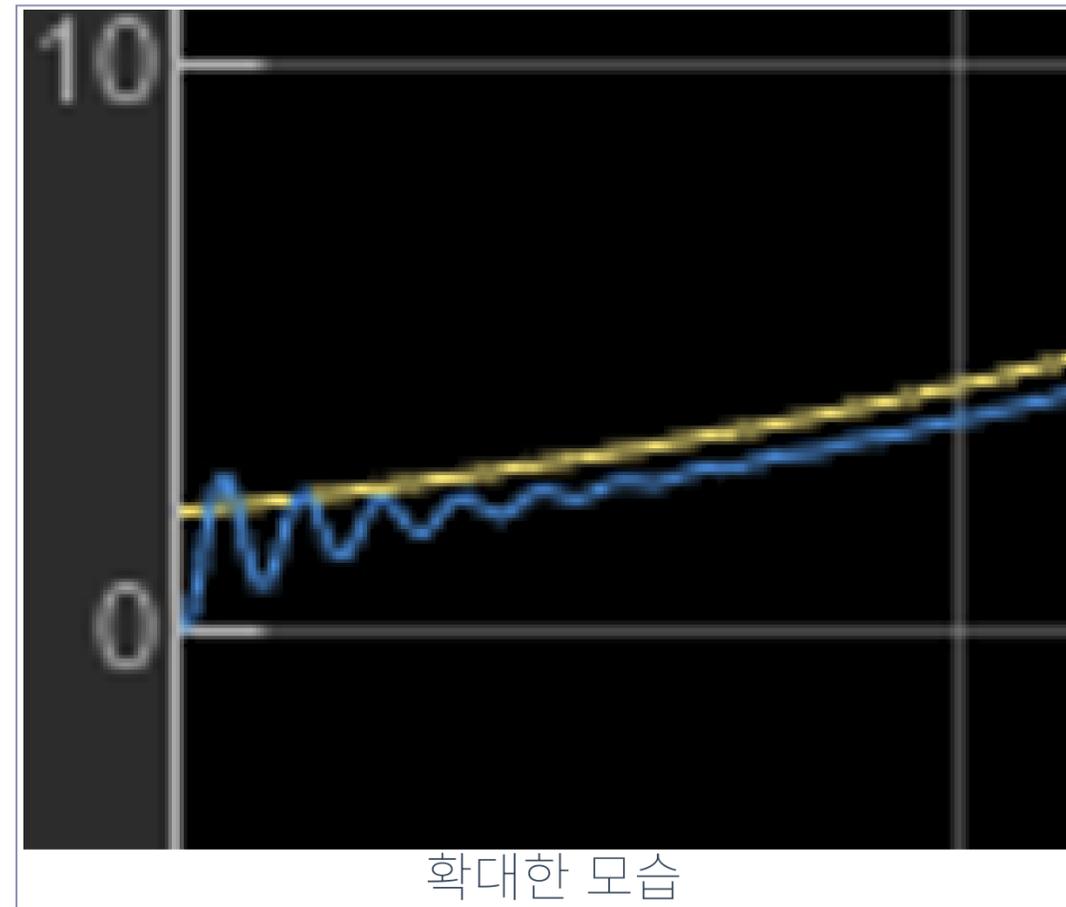
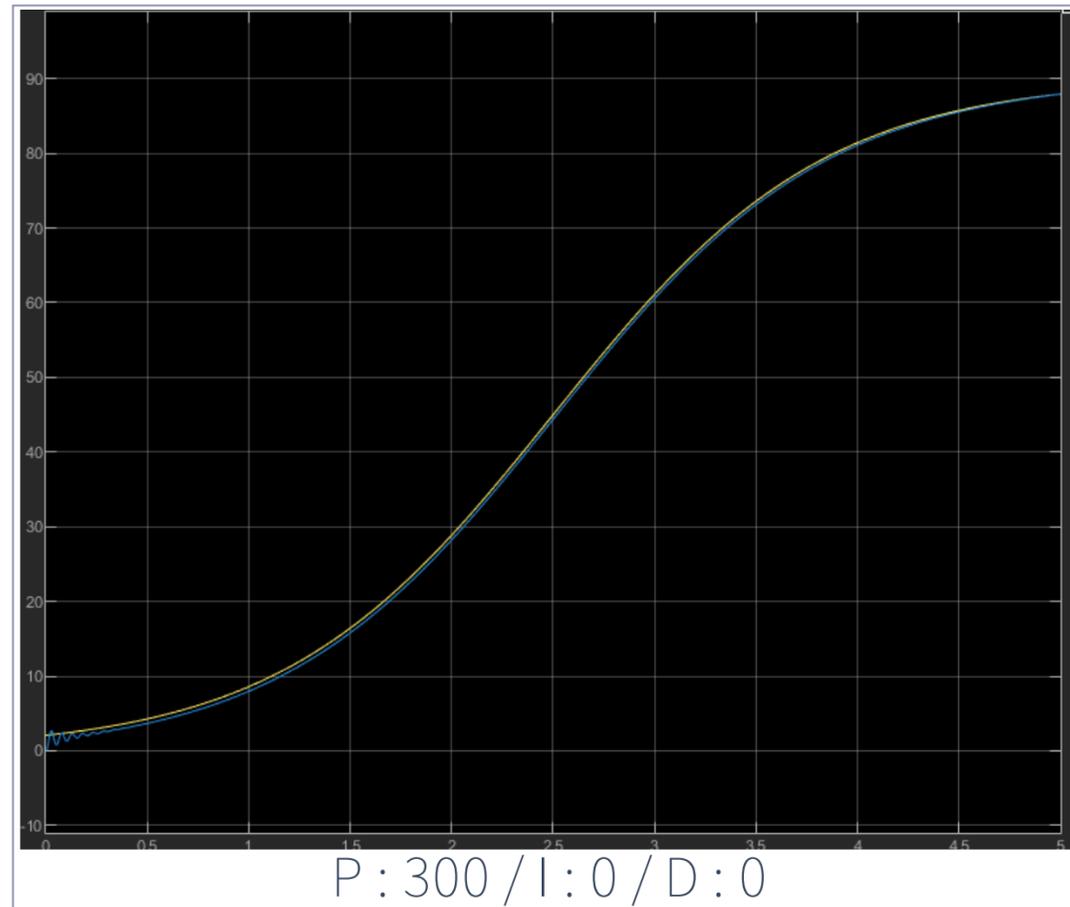


P값이 커지면서 제어값(파란색)이 목표값(노란색)에 가깝게 붙어가는 모습

04

SIMULINK

P값 결정

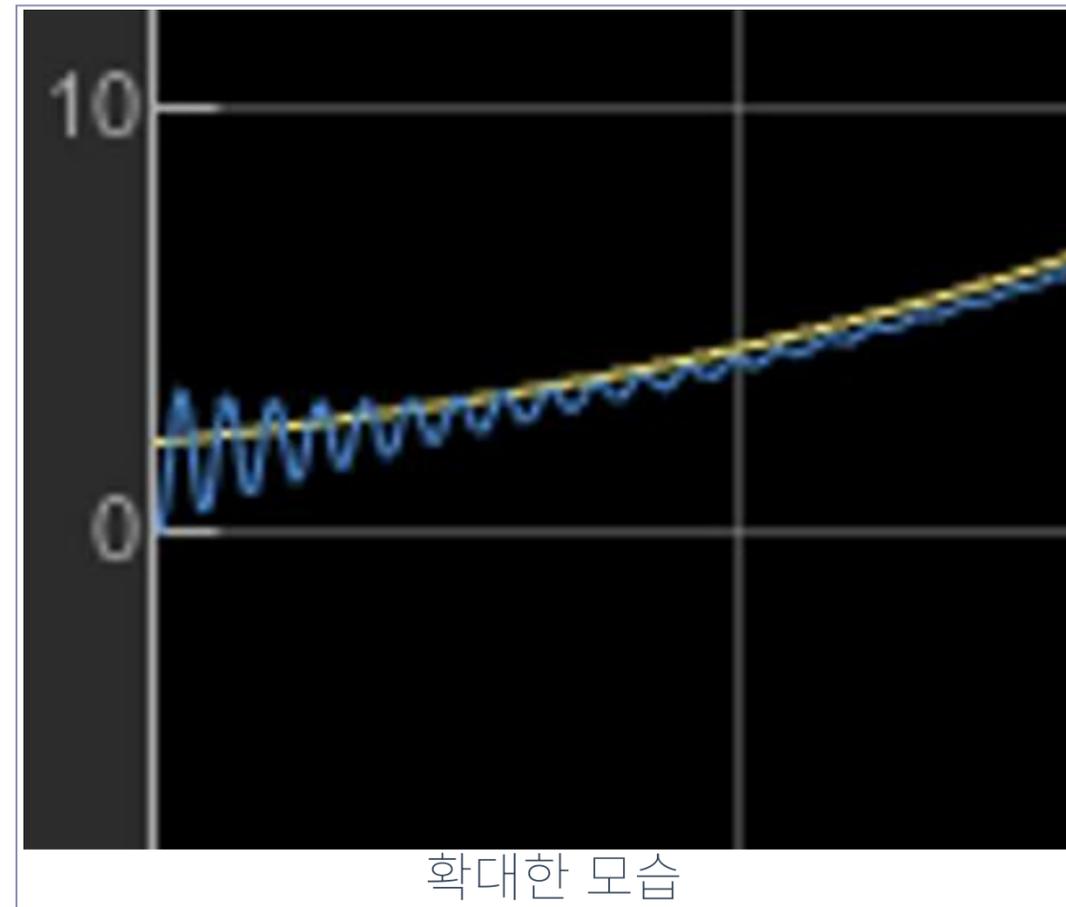
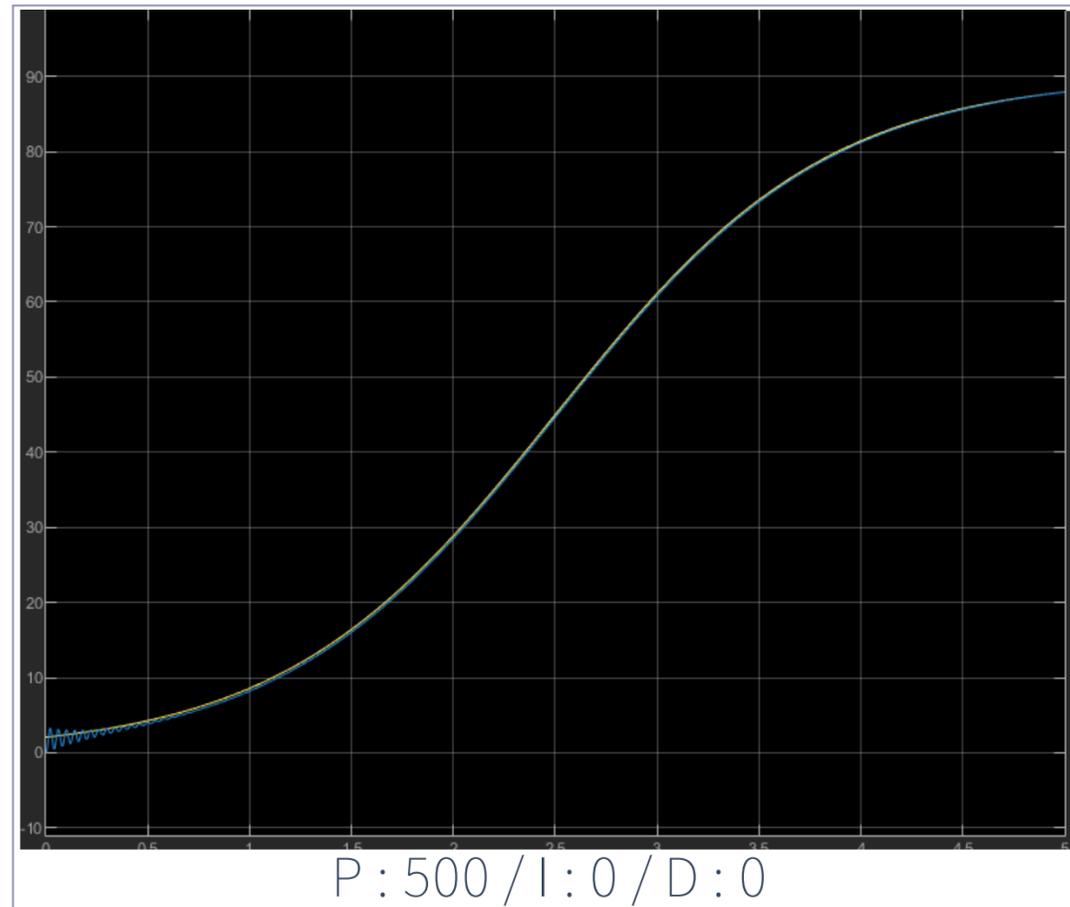


P값이 과도하게 커지면 초반에 오버슈팅 발생

04

SIMULINK

P값 결정

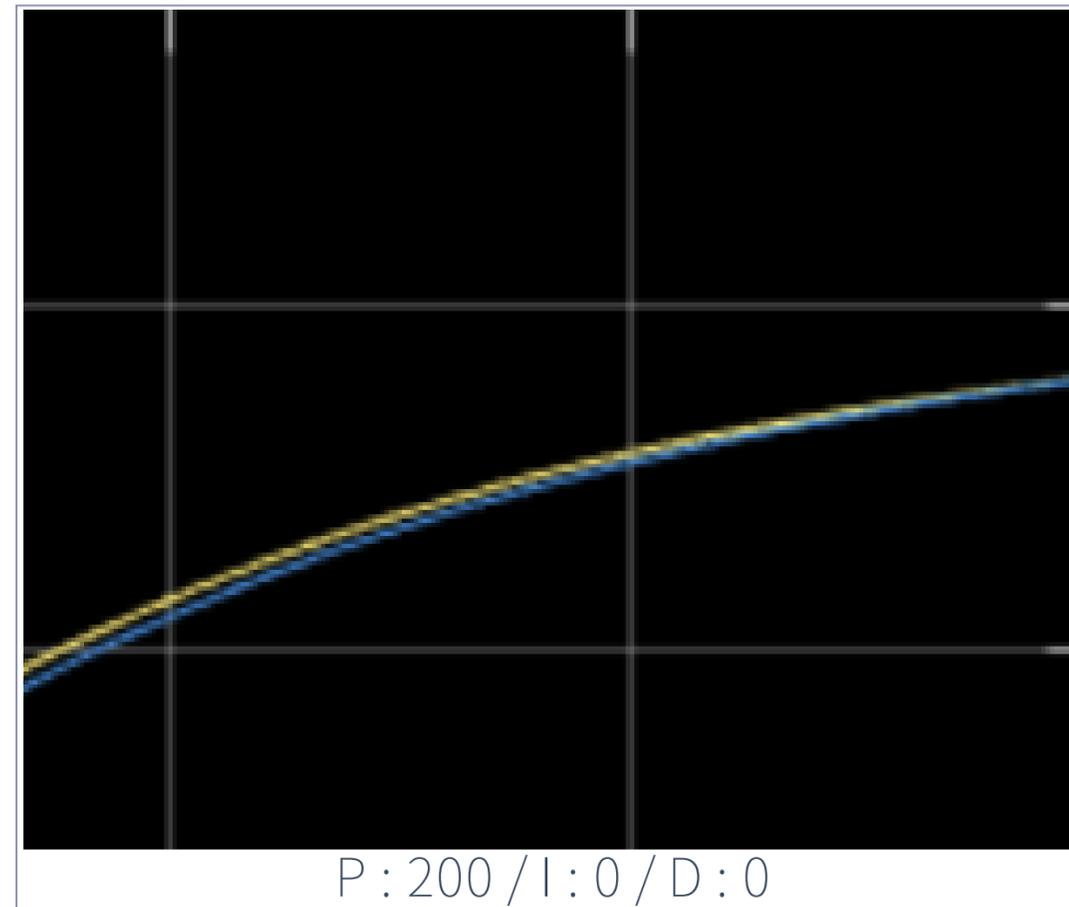
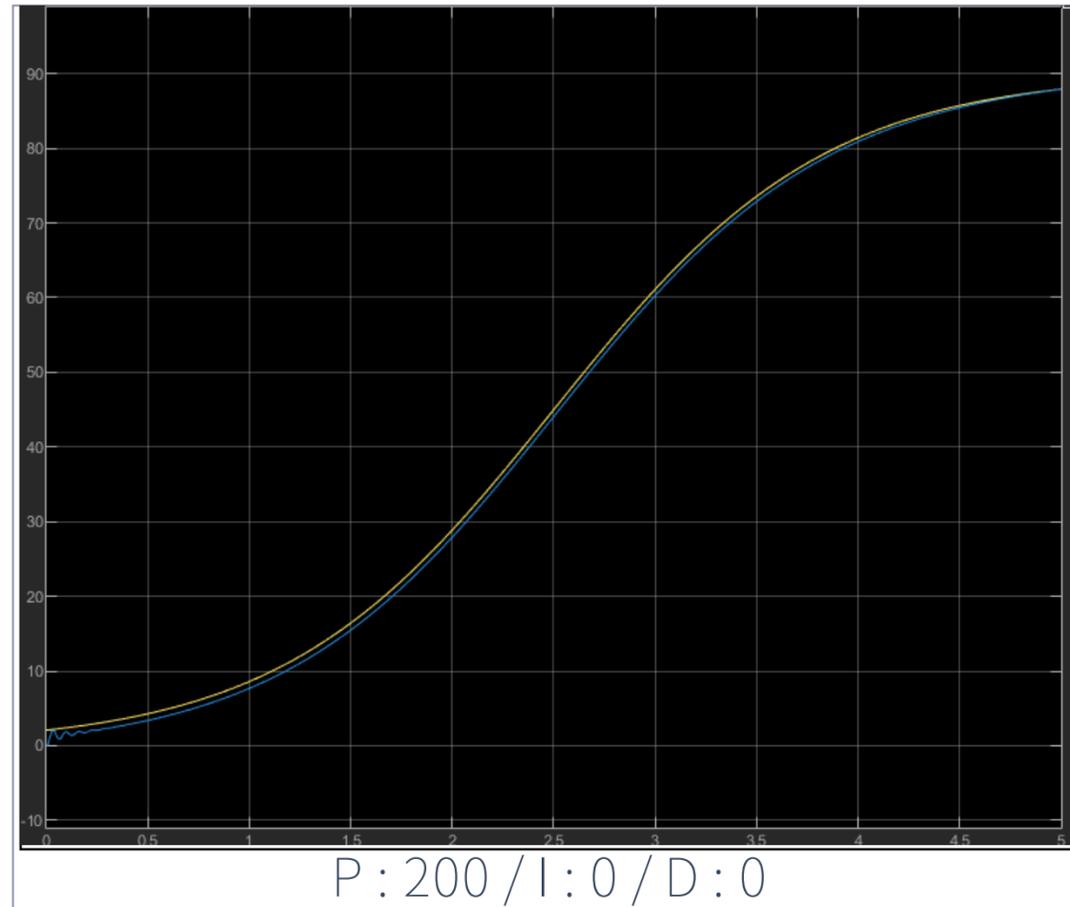


P값이 과도하게 커지면 초반에 오버슈팅 발생

04

SIMULINK

I값 결정

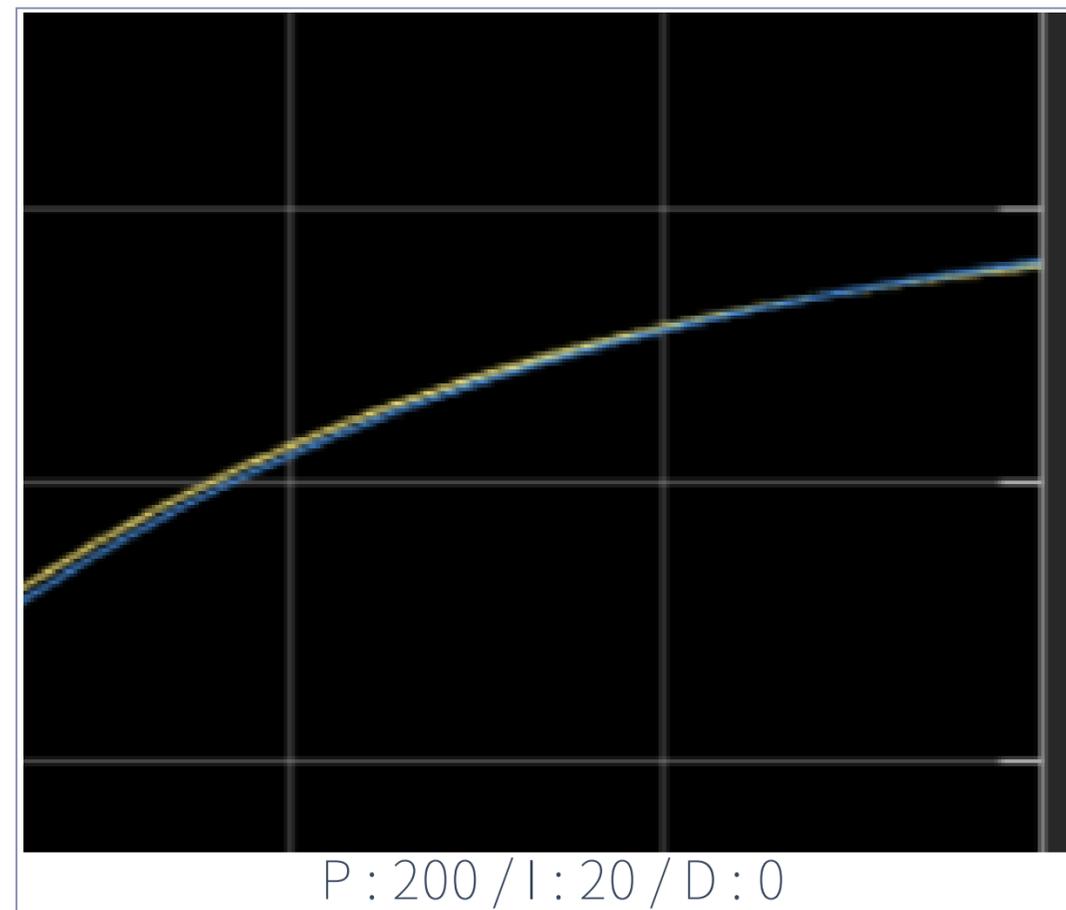
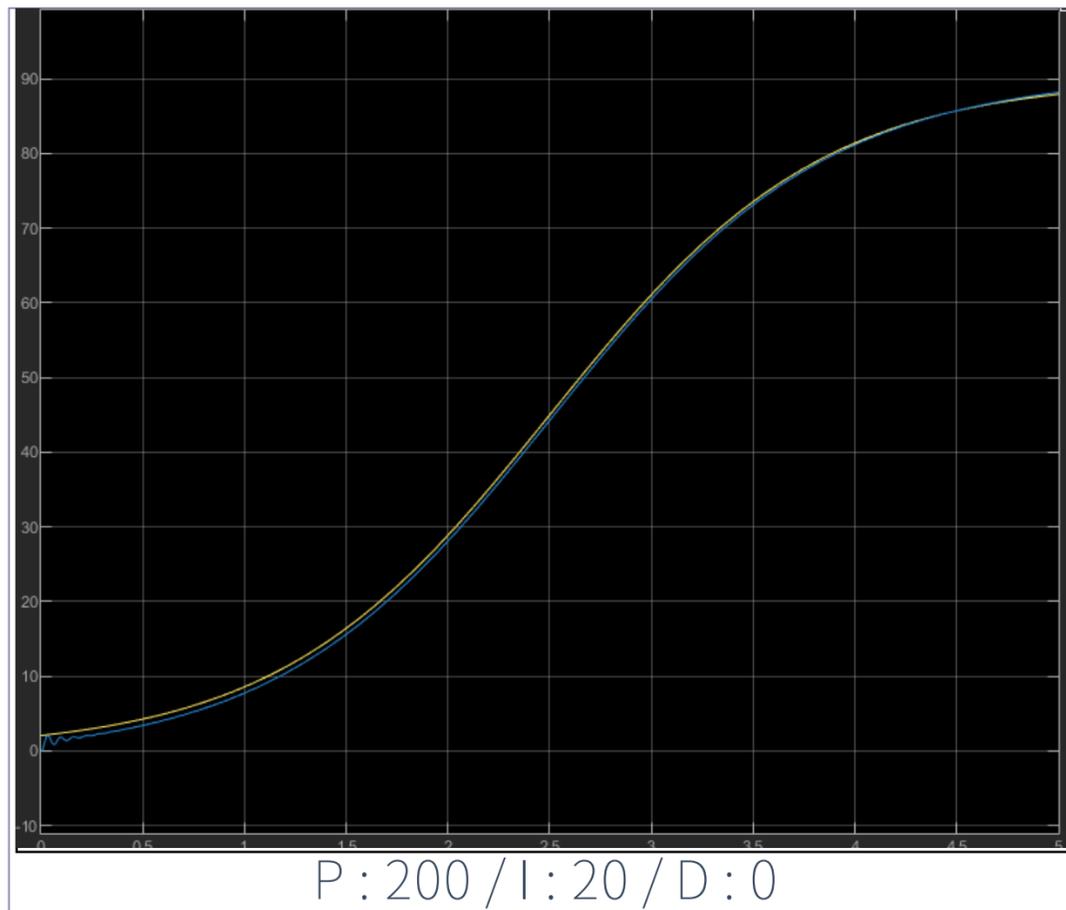


이전 슬라이드에서 P GAIN = 200으로 결정하였음

04

SIMULINK

I값 결정

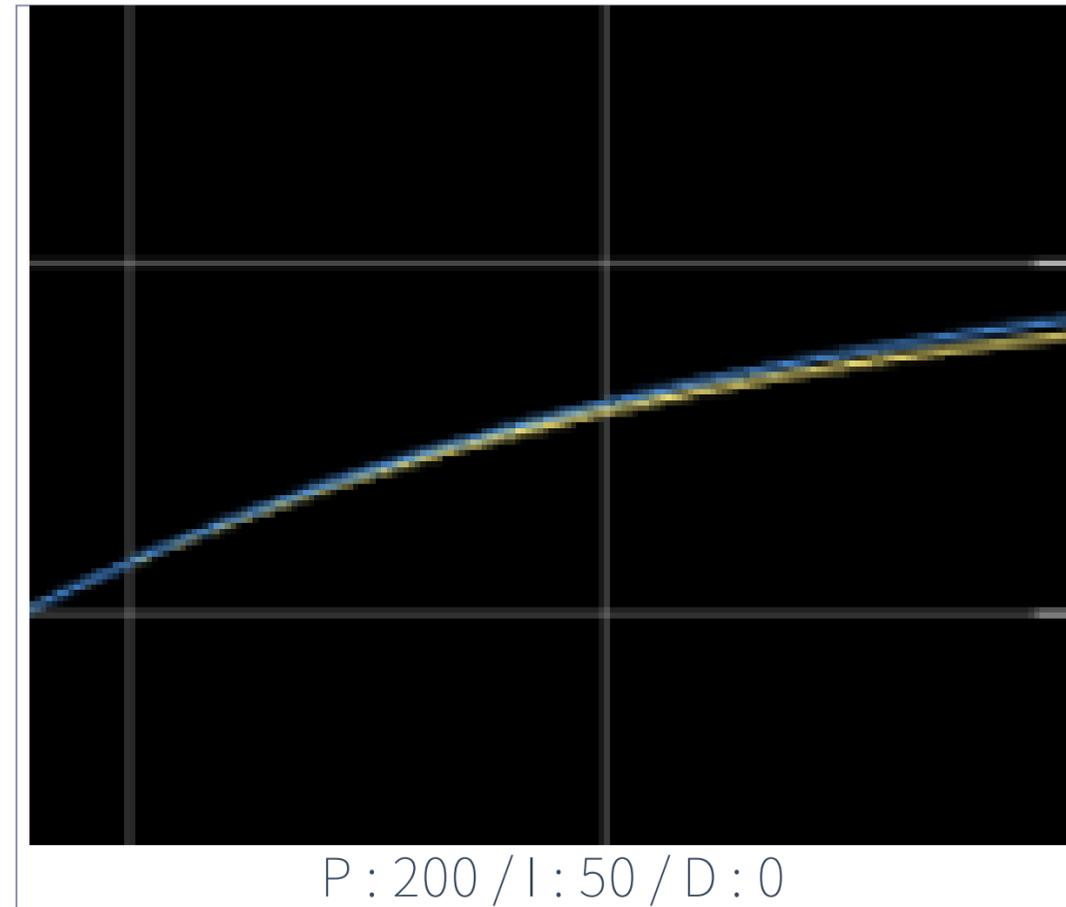
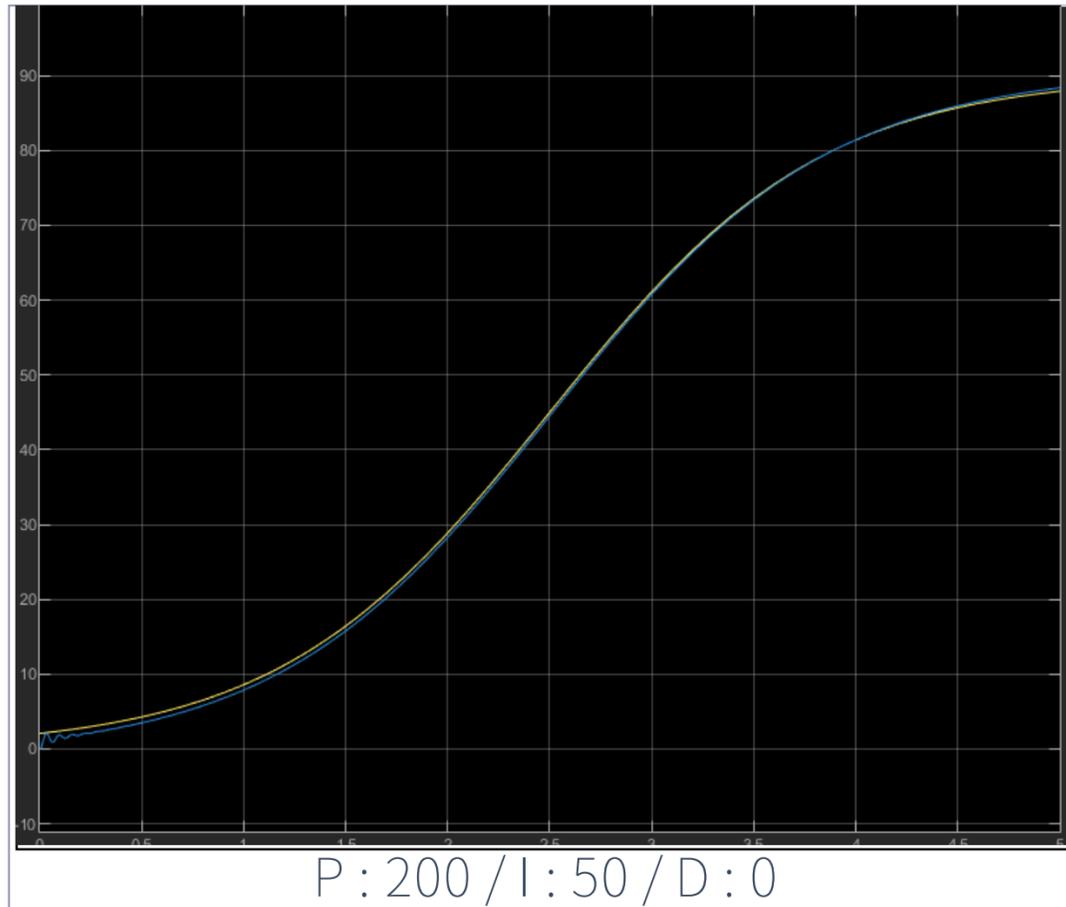


I값이 커지면서 P값 튜닝 때는 잡히지 않던 오차가 잡혀가는 모습

04

SIMULINK

I값 결정

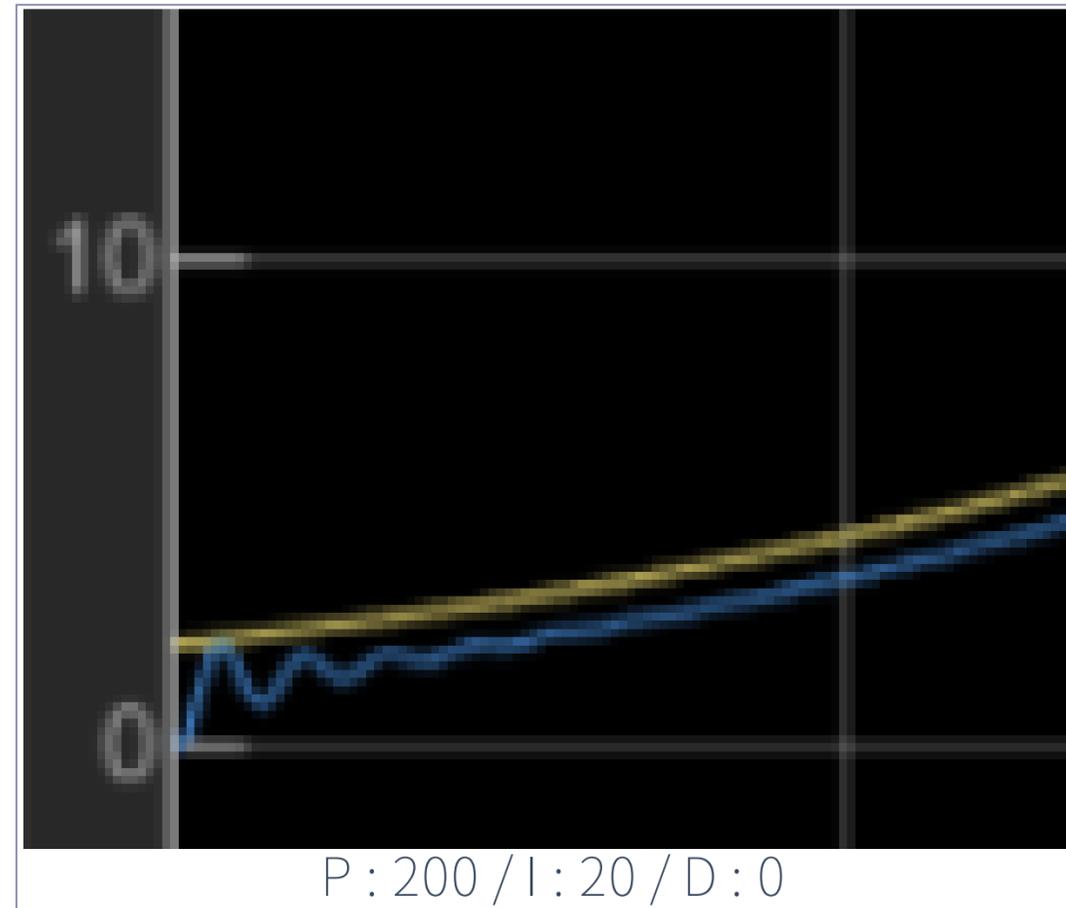
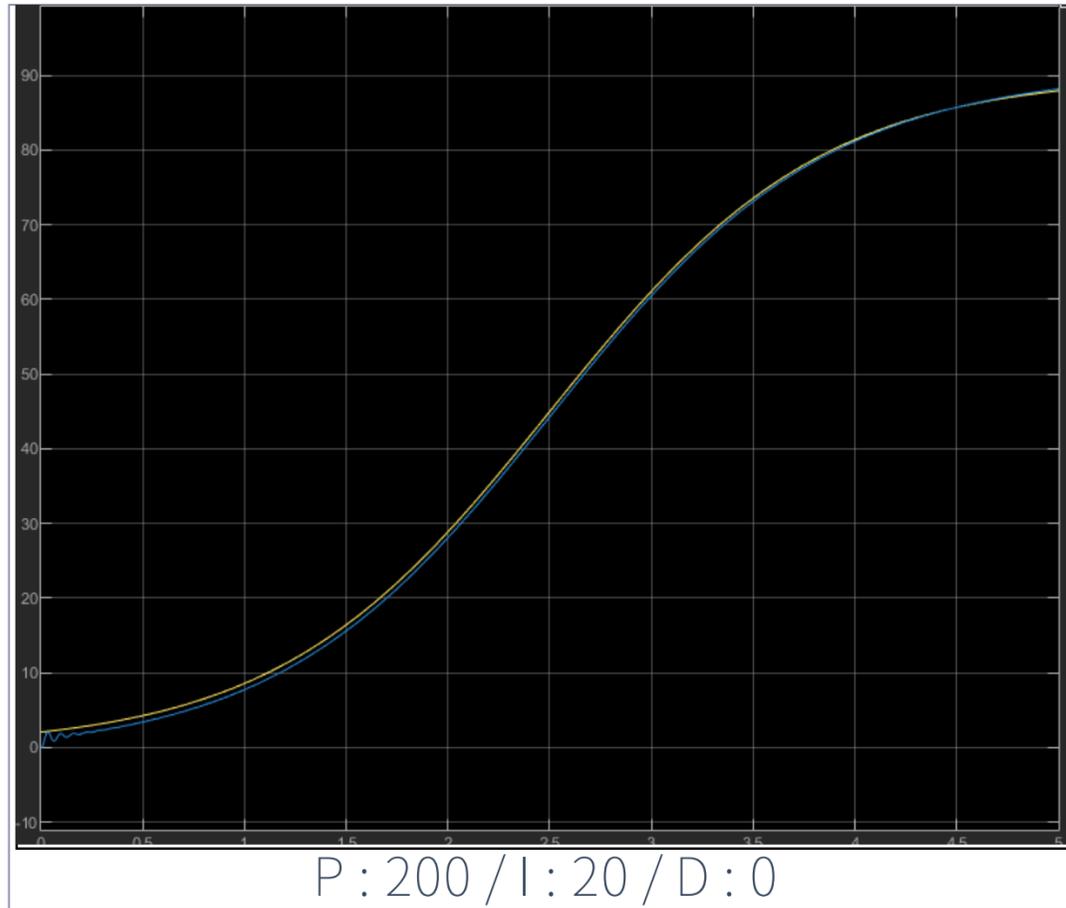


I값이 과도하게 커지면 끝부분에서 오버슈팅 발생

04

SIMULINK

D값 결정

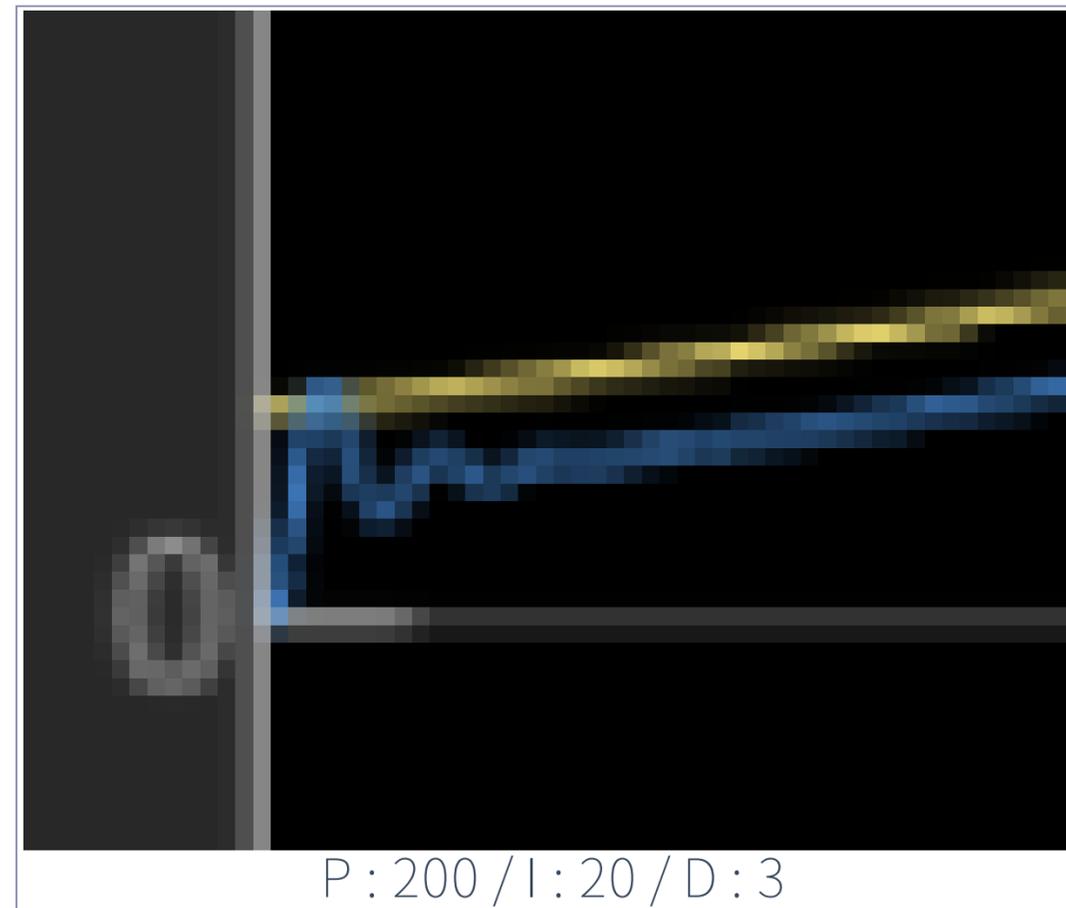
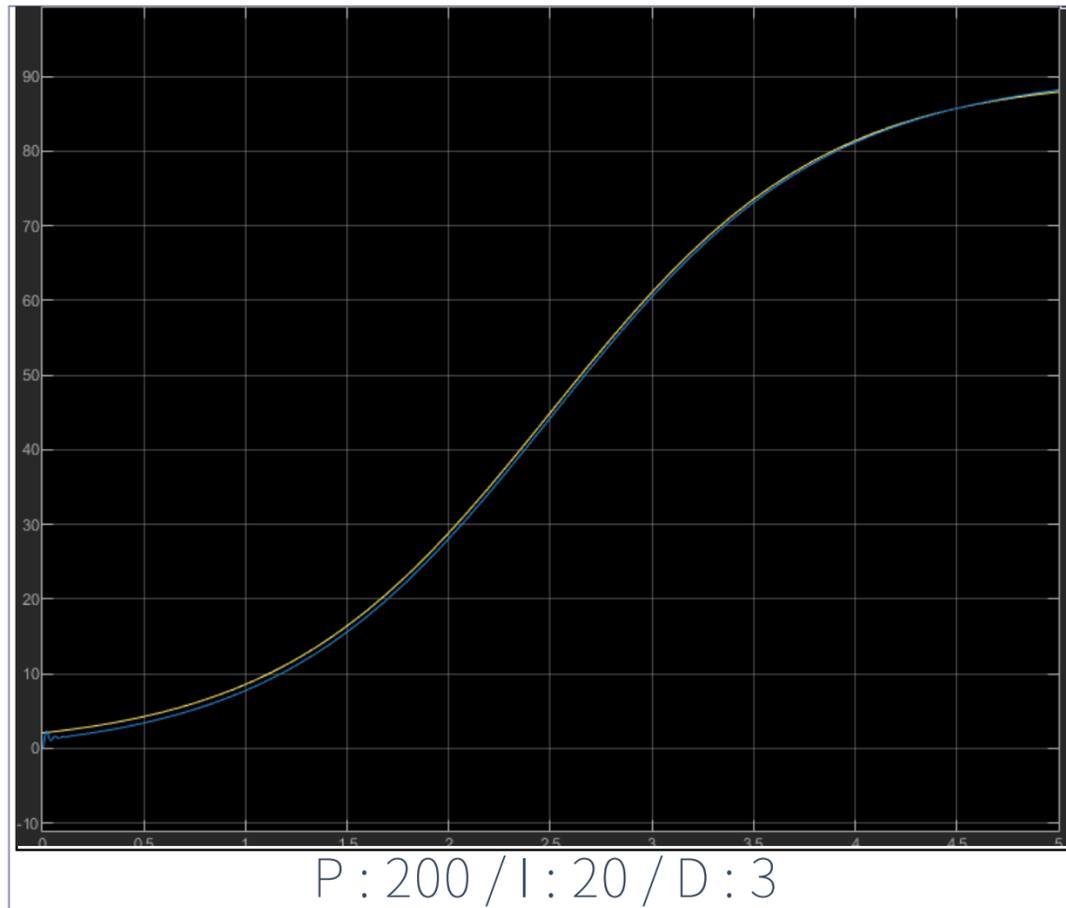


이전 슬라이드에서 I GAIN = 20으로 결정하였음

04

SIMULINK

D값 결정

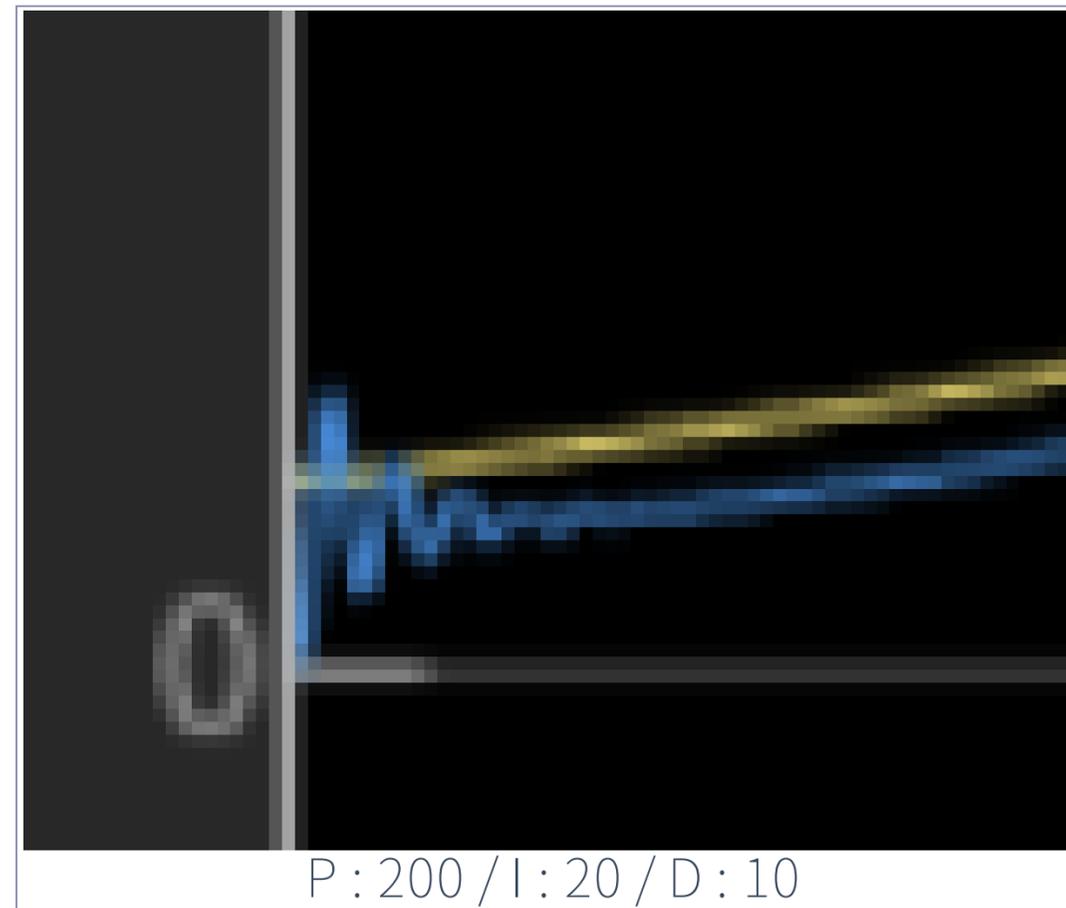
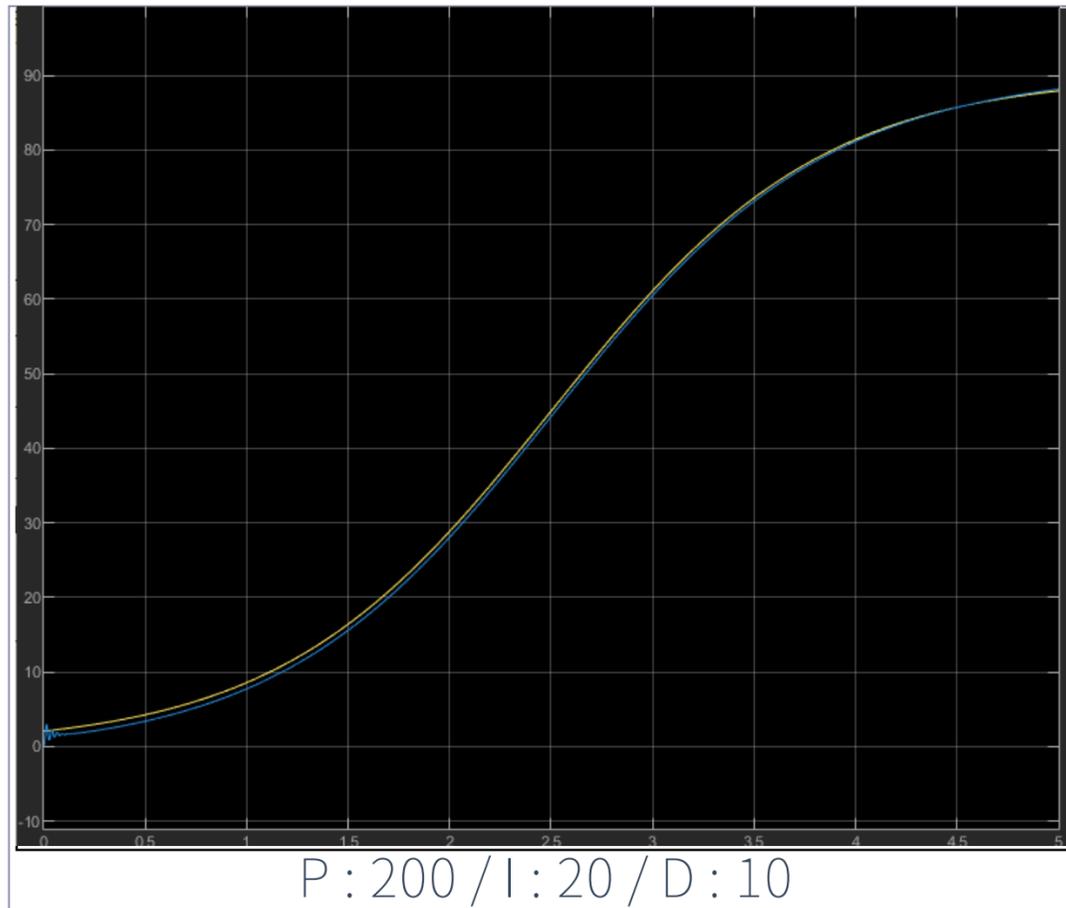


D값이 커지면서 초반부분에 있던 진동이 빠르게 잡혀가는 모습

04

SIMULINK

D값 결정

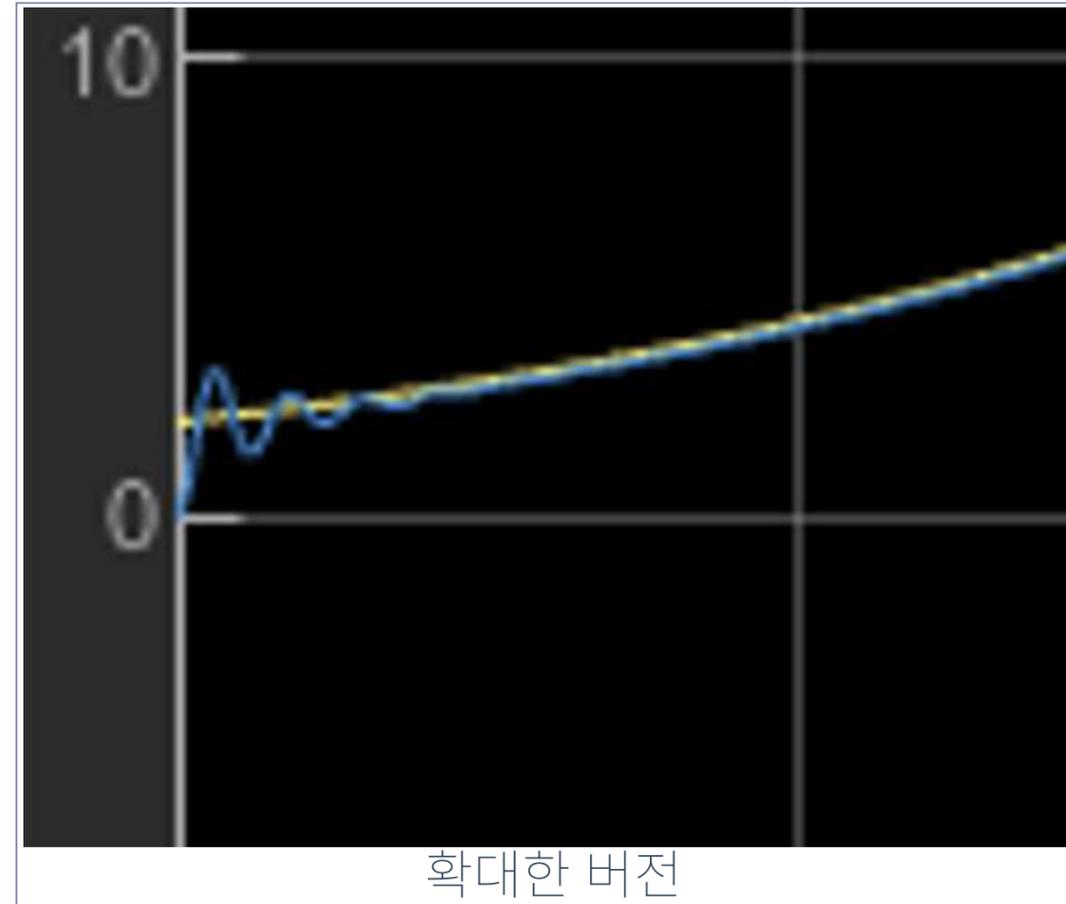
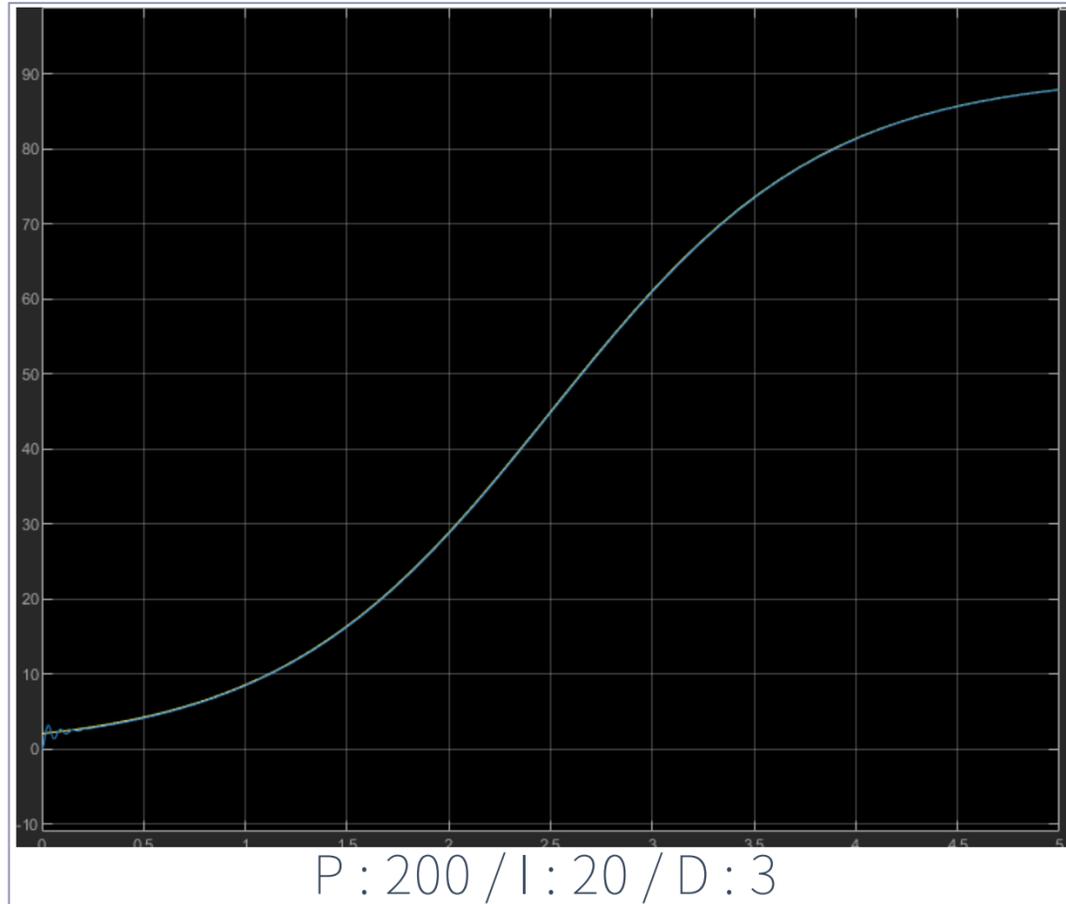


D값이 커지면서 초반부분에 있던 진동의 폭이 커져서 오버슈팅이 일어남

04

SIMULINK

실험값 대입

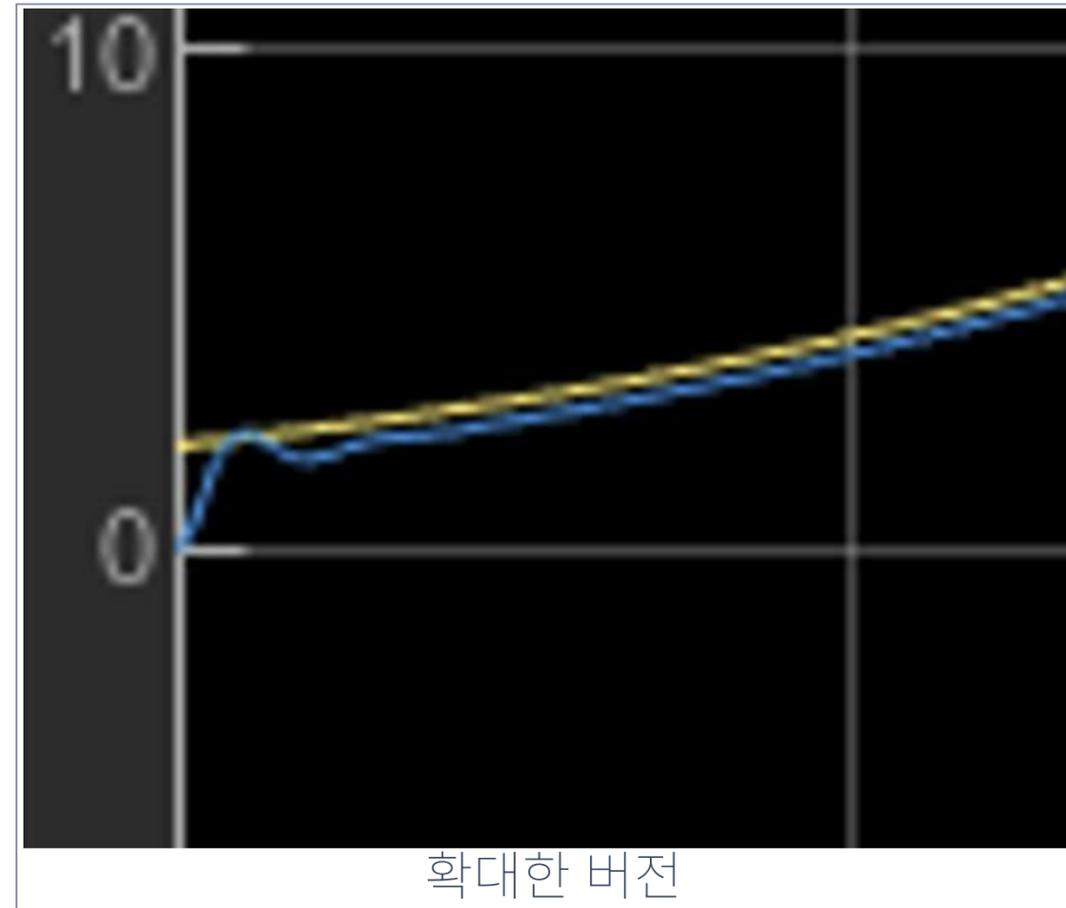
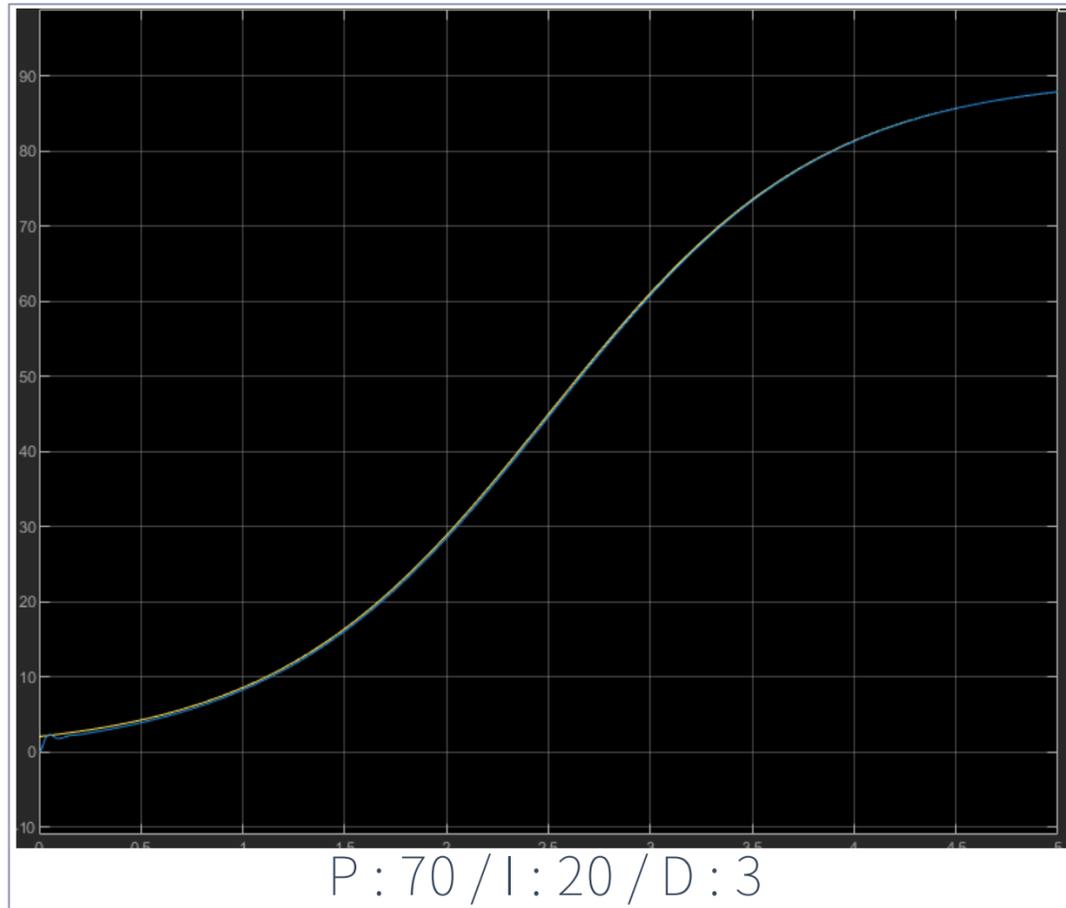


이론값 기준으로 튜닝한 파라미터가 실험값에선 오버슈팅이 일어나는 모습

04

SIMULINK

실험값 대입



실험값에서도 오버슈팅이 일어나지 않도록 P값 마진을 여유롭게 설정

**최적의 제어를 위한 GAIN값
은**

P : 70 / I : 20 / D : 3 이다!

04

SIMULINK

실험값 대입 시 오버슈팅이 왜 일어났는가?

COMSOL은 등속도 운동을 가정

→ COMSOL 실험값에선 초반부에 급격한 부하가 걸린다.

SIMULINK에서는 S Curve를 기준으로

파라미터를 타이트하게 튜닝 → 안전마진이 부족했다.

05 결론 및 고찰

05

결론

 COMSOL

“모멘트 값”

각 로터에 23000N의 추력이
작용한다는 가정 하에,
틸팅 모멘트는
96,292Nm ~ 127,267Nm 이다!

 SIMULINK

“최적의 PID GAIN값”

5초에 90도를 회전하는
이상적인 S-CURVE를
따라가기 위해 필요한 PID GAIN값은
P : 70 / I : 20 / D : 3 이다!

05

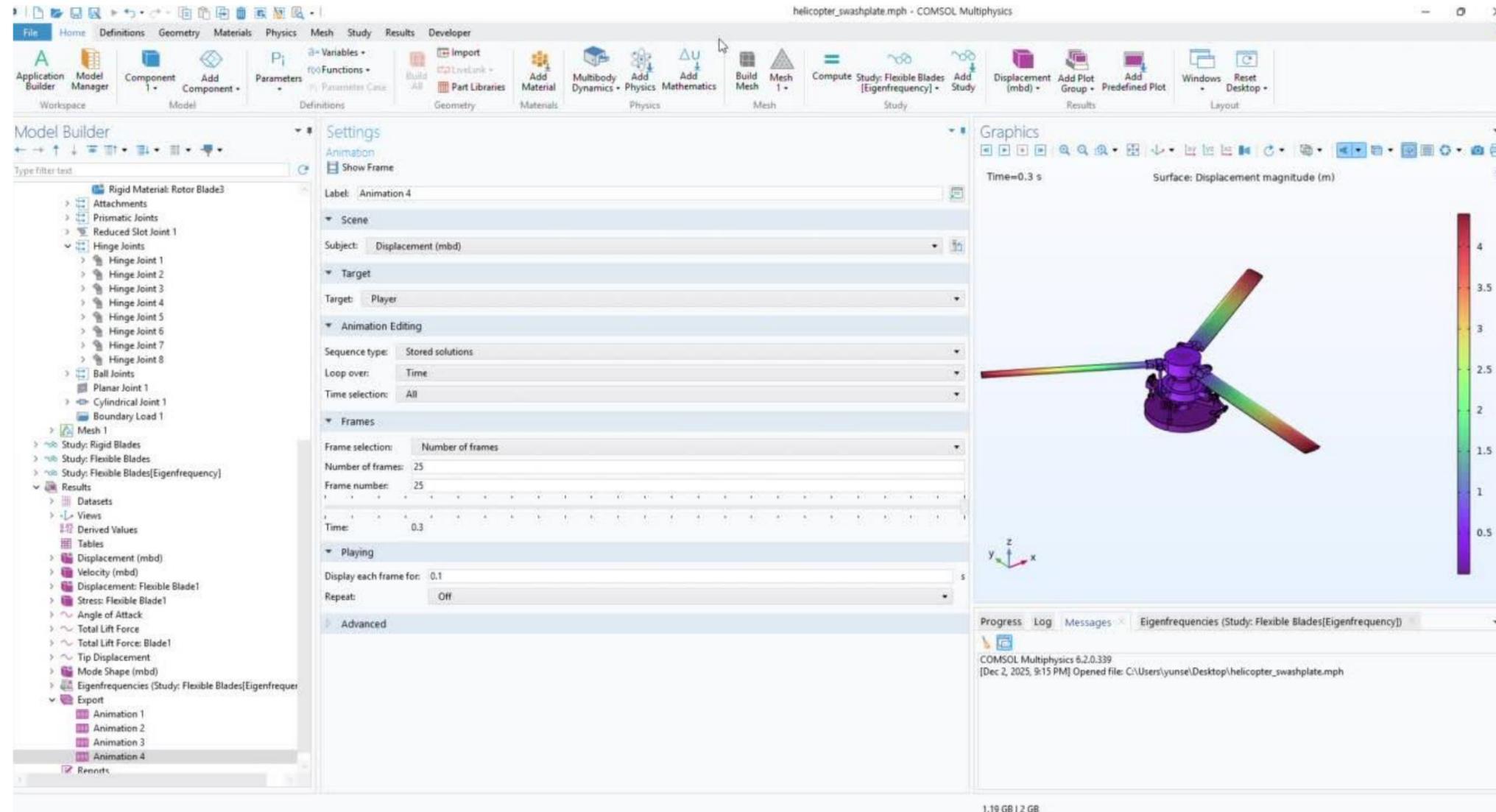
고찰



1. 복잡성에 따른 단순화 문제

05

고찰

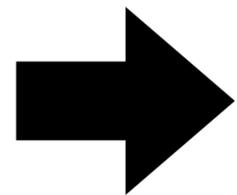


복잡성 증가로 인해 실제 로터의 추력 계산 불가

05

고찰

- 실제 프로펠러의 추력 도출 실패
- Geometry, Material 단순화
- 그에 따른 응력, 자이로 교란 단순화에 따른 모델의 신뢰성 하락



필요한 부분만 모델링 하여 계산량 감소 필요

05

고찰

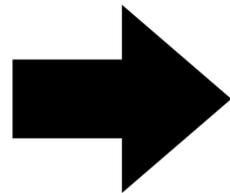


2. PID 제어기 튜닝 시 안전마진

05

고찰

- 이론값 반력을 기반으로 PID 튜닝
- 반면 COMSOL은 등속도 회전이라 초반에 강한 반력 작용
- 그에 따른 오버슈팅이 일어나는 문제



P값 안전마진의 중요성

05

고찰

3. 오차

05

고찰

COMSOL

시간(s)	값(Nm)
0.5	127267.28
1	102445.20
1.5	96292.98
2	103631.93
2.5	111324.22

시간(s)	값(Nm)
3	113464.37
3.5	113465.97
4	113465.98
4.5	113465.98
5	113465.98

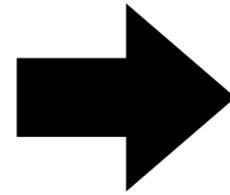
05

고찰

Analytic Solution

<u>t</u>	<u>M_t</u>
0	81164
0.5	81154
1	81005
1.5	80360
2	78634
2.5	75036
3	68632
3.5	58473
4	43798
4.5	24334
5	663.52

초반에는
10%대의 오차율



갈수록 점점 커지는
오차를 보인다.

05

고찰

- COMSOL에서 로터의 추력 고정 → 이론 값도 추력 고정
- COMSOL에선 마찰을 고려 → 이론 값은 마찰 고려 X
- COMSOL에선 프로펠러 무게 고려 → 이론값은 나셀만 고려
- 실제 나셀의 복잡한 무게 배분 및 내부 요소를 무시

참고 문헌

- 1) 김재무. (2014-04-17). 틸트로터 항공기의 기술적 이슈 및 최근 세계 동향. 한국항공우주학회 학술발표회 초록집, 서울.
- 2) Harris, F. D. (2017). Tiltrotor Conceptual Design (NASA/CR—2017–219474). F. D. Harris & Associates. NASA Ames Research Center.
- 3) Beer, F. P. (2020). 공학도를 위한 동역학. 퍼스트북.
- 4) 김부민. (2009). 틸트로터 항공기의 신경회로망 기반 적응유도제어기 설계 연구. 국내박사학위논문 경상대학교 대학원, 경상남도
- 5) Rosenstein, H., and R. Clark, “Aerodynamic Development of the V-22 Tilt Rotor,” Proceedings of the 12th European Rotorcraft Forum, Garmisch Partenkirchen, FRG, Sept. 22–25, 1986.
- 6) [Jong-Nam Bae](#). (2020). Variable speed reference control of a high-speed BLDC motor for a blender machine. [IET Electric Power Applications](#)

감사합니다

THANK YOU!