

Team : Roller coaster tycoon
Member : 2003006063 PARK Yun su
2004006527 JUNG Jin young

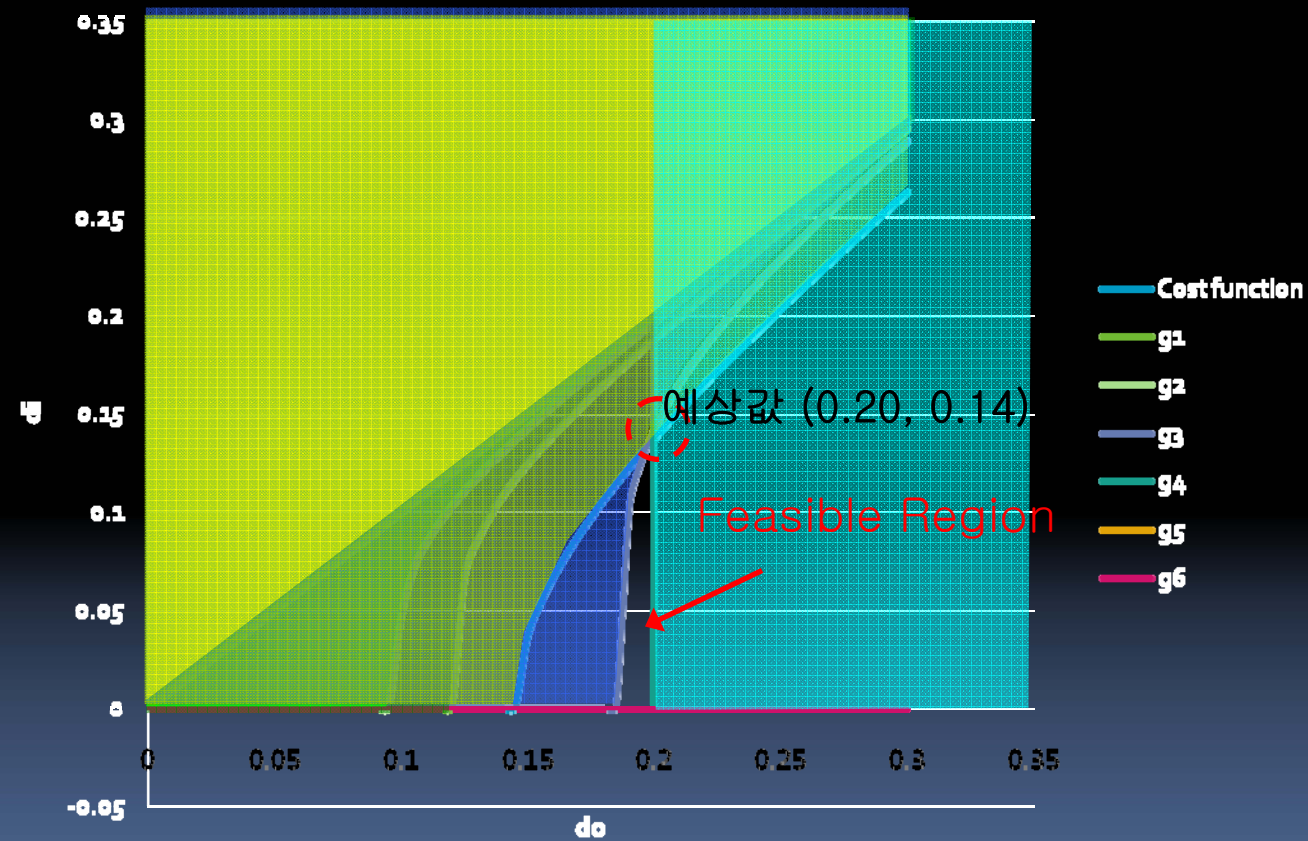
THE DESIGN OF ROLLER COASTER

Review the prior Project

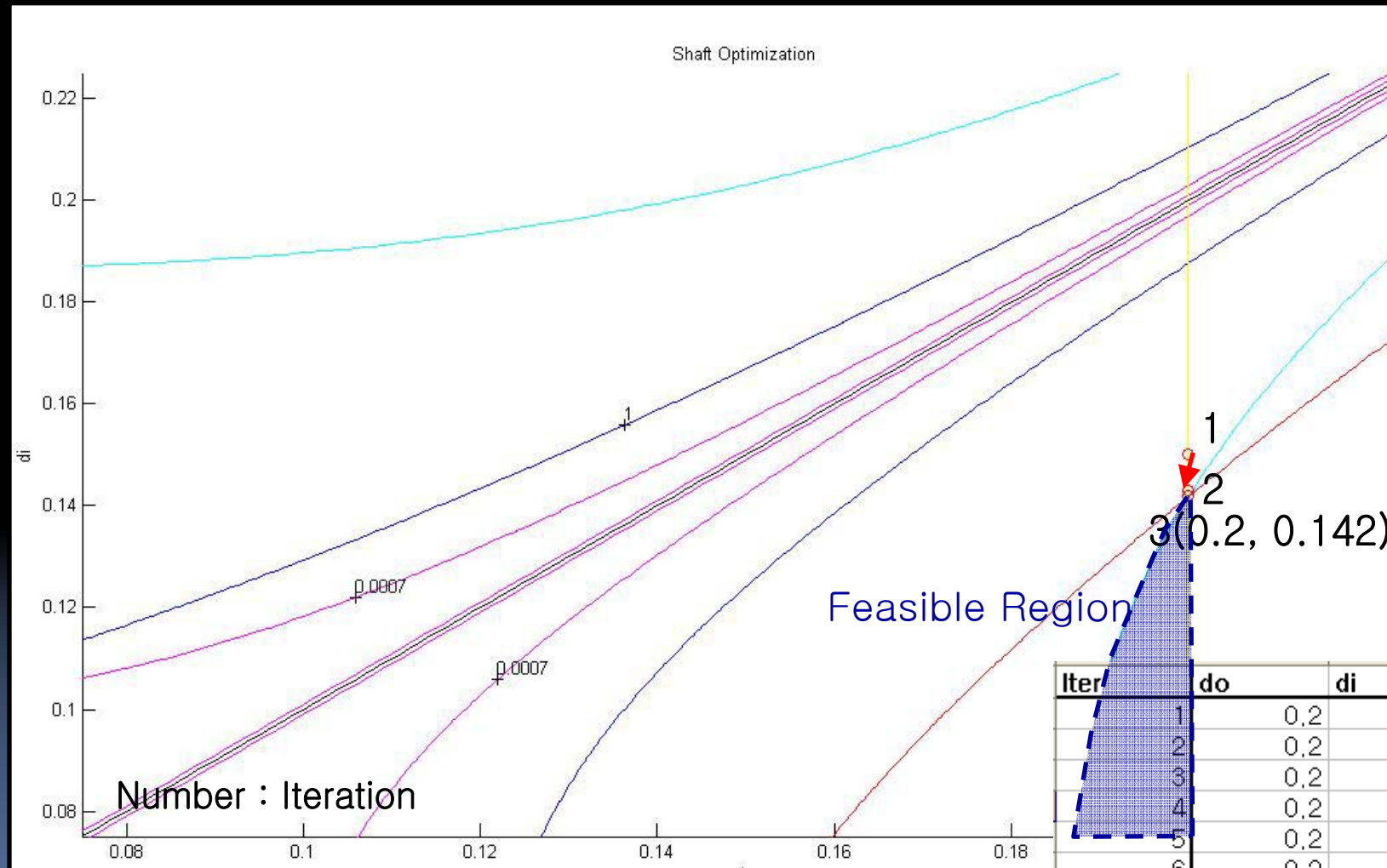
- 동력이 있는 롤러 코스터를 설계시 추가적인 설비에 필요한 축 및 베어링의 가격 최소화를 목적으로 한다.
- 가격은 축의 크기 및 베어링의 선정에 좌우된다.
- 축 : 최대동력을 버틸 수 있는 축크기를 최소화 한다. (중공축 선정  부피감소)
- 측면 베어링 : 축에 결정에 따라 결정되나 Thrust, Radial하중을 버틸 수 있어야 한다.

Optimization using Excel

3/25



Optimization using Matlab 4/25



Iter	do	di	
1	0.2	0.15	
2	0.2	0.143	
3	0.2	0.142	
4	0.2	0.142	
5	0.2	0.142	
6	0.2	0.142	
7	0.2	0.142	end

Project/Problem Statement

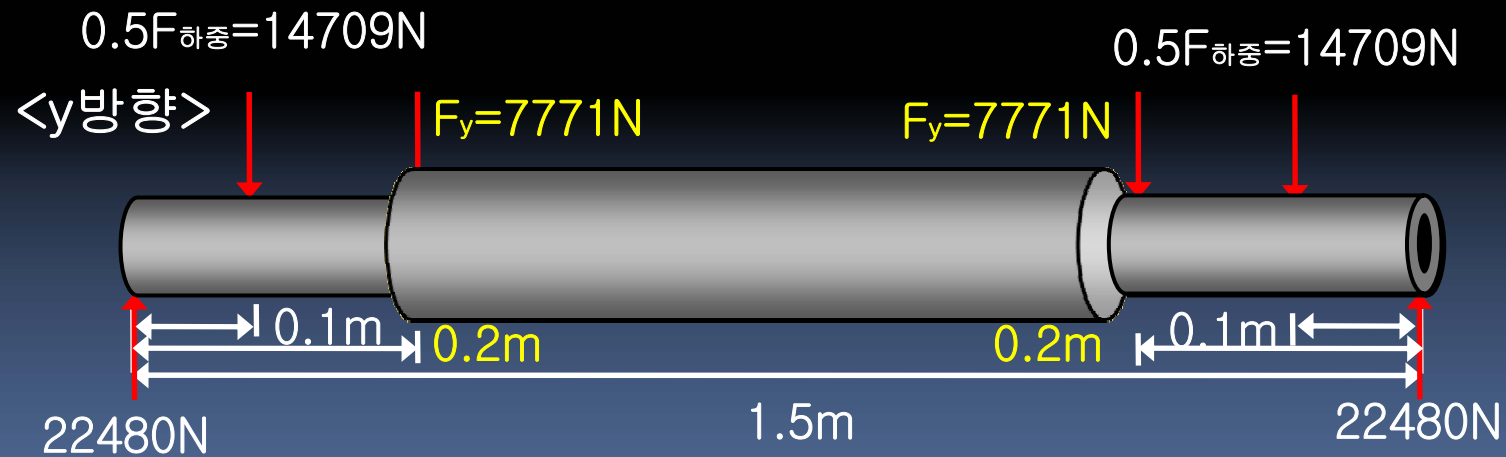
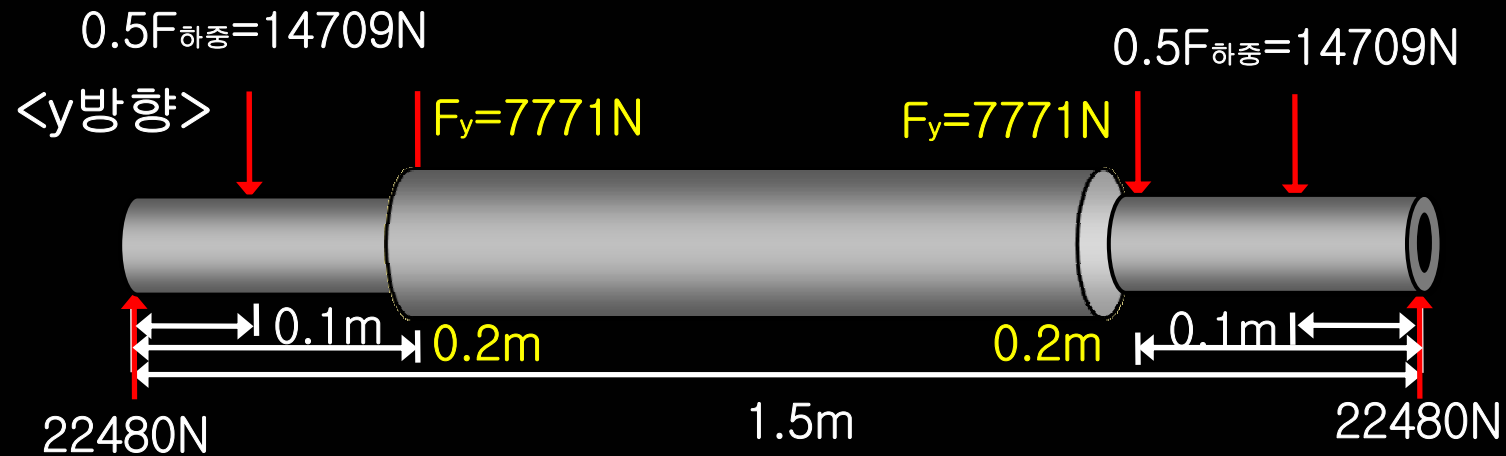
- 동력이 있는 롤러 코스터를 설계시 추가적인 설비에 필요한 축 및 베어링의 가격 최소화를 목적으로 한다.
- 가격은 축의 크기 및 베어링의 선정에 좌우된다.
- 축 : 최대동력을 버틸 수 있는 축크기를 최소화한다. (중공축 선정  부피감소)

(높은 M_{max} 를 낮추기 위해서 동력의 전달을 두 부분으로 분리)

(응력 분포에 따른 축의 형상 변화)

- 측면 베어링 : 축에 결정에 따라 결정되나 Thrust, Radial하중을 버틸 수 있어야 한다.

Analysis



Check Optimization using solver

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Project 2에서의 기존 축							
2	do	di	cost		축식	처짐량	기울기	크기제한
3	0.2	0.14217	0.00742		0.066567	0.000127481	5.61014E-05	0.2
4								
5					1	0.000127	0.0007	
6	두개의 동력으로 나누어 향상된 축							
7	do	di	cost		축식	처짐량	기울기	크기제한
8	0.2	0.17146	0.00398		0.0120062	0.000127667	0.000276396	0.2
9								
10					1	0.000127	0.0007	
11	얇은 축의 내경을 기준으로 가공한 결과							
12	do	di	cost		축식	처짐량	기울기	크기제한
13	0.165	0.04873	0.00932		0.0079076	0.00012769	0.000276447	0.165
14								
15					1	0.000127	0.0007	

- 축의 내경이 얇은 축을 기준으로 선정되기 때문에 중간부분에서 필요이상으로 두꺼워짐.
- 만일 각 부분에서 요구되는 내경으로 뚫기 위해서는 상당한 가공비가 예상
- 최대동력을 버틸 수 있는 축 크기를 최소화 할 때에 **응력 분포에 따른 축의 형상 변화**는 최적 값에서 멀어짐을 판단.

Project/Problem Statement

- 동력이 있는 롤러 코스터를 설계시 추가적인 설비에 필요한 축 및 베어링의 가격 최소화를 목적으로 한다.
- 가격은 축의 크기 및 베어링의 선정에 좌우된다.
- 축 : 최대동력을 버틸 수 있는 축크기를 최소화한다. (중공축 선정  부피감소)

(높은 M_{max} 를 낮추기 위해서 동력의 전달을 두 부분으로 분리)

- 측면 베어링 : 축에 결정에 따라 결정되나 Thrust, Radial하중을 버틸 수 있어야 한다.

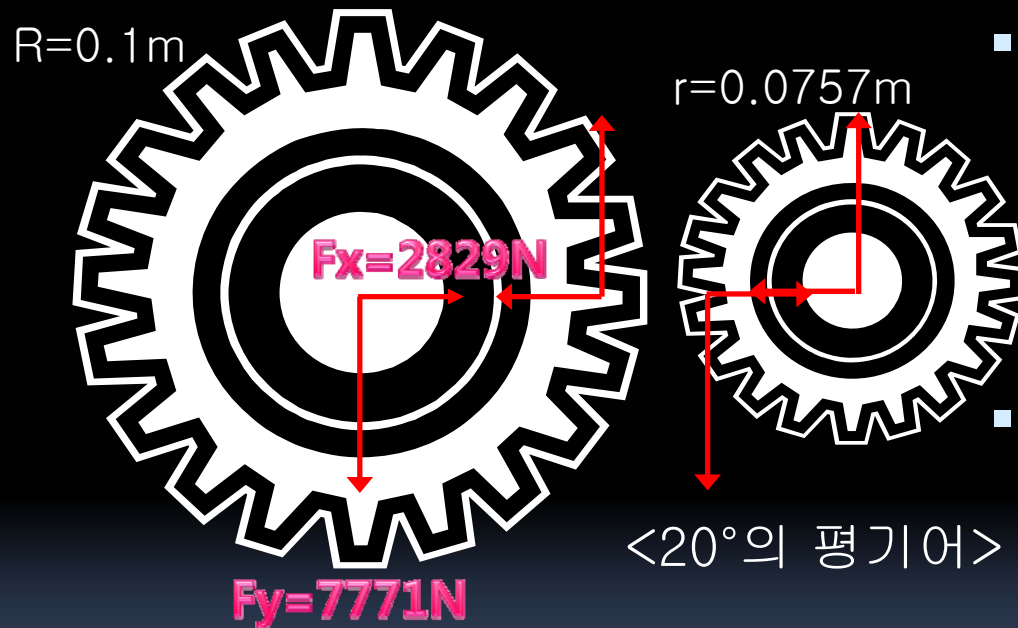
Constant

- Safety Factor(N) = 2
- SAE 1020
 $S_y = 2.07 \times 10^8 \text{ (Pa)}$
 $S_{ut} = 3.79 \times 10^8 \text{ (Pa)}$
 $Se = Se' \cdot C_{load} \cdot C_{size} \cdot C_{surf} \cdot C_{temp} \cdot C_{reliab} = 84698477$
 $Se' = 0.5 \cdot S_{ut} = 1.9 \times 10^8 \text{ (Pa)}, C_{load} = 1,$
 $C_{size} = 1.189 \cdot (d_o \cdot 1000)^{-0.097} = 0.7225$
 $C_{surf} = 0.76, C_{temp} = 1, C_{reliab} = 0.814$
- 응력집중계수 (k) = 1
- 동력차의 하중 (F) = $3000 \cdot 9.806 = 29418 \text{ (N)}$
- 베어링 사이의 여유(b-a) = 0.1 (m)
- 기어와 베어링 사이의 여유=0.1(m)

Constant

- 엔진 회전속도(V_e) = 1400 (rpm)
- 축 회전속도(V_a) = 1059.972 (rpm)
- 엔진 토크 (T_e) = $1200 * 9.806 = 1176.72$ (N*m)
- 축의 토크 (T) = $T_e * V_e / V_a = 1554.2$ (N*m)
- 동력전달 기어의 반지름 = 0.1 (m)
- $M_{y,max} = 3025.1$, $M_{x,max} = 282.9$
 $M_{max} = 3038.3$ (N*m)
- 레일폭 (L) = 1.5 (m)
- 바퀴의 반지름 (r) = 0.2 (m)

동력 전달 과정 및 엔진 선정



- 엔진축이 1177Nm @ 1400rpm †으로 회전하면서 축으로 1554Nm @ 1060rpm 의 토크를 전달하게 된다.
- 엔진축에서 축으로 전달되는 기어를 두 쪽으로 나누었다.
- $2 \cdot F_y = T/r$ 관계에 따라 $F_y=7771\text{N}$ 또한 $F_x = F_y \cdot \tan(20^\circ) = 2829\text{N}$ 이다.

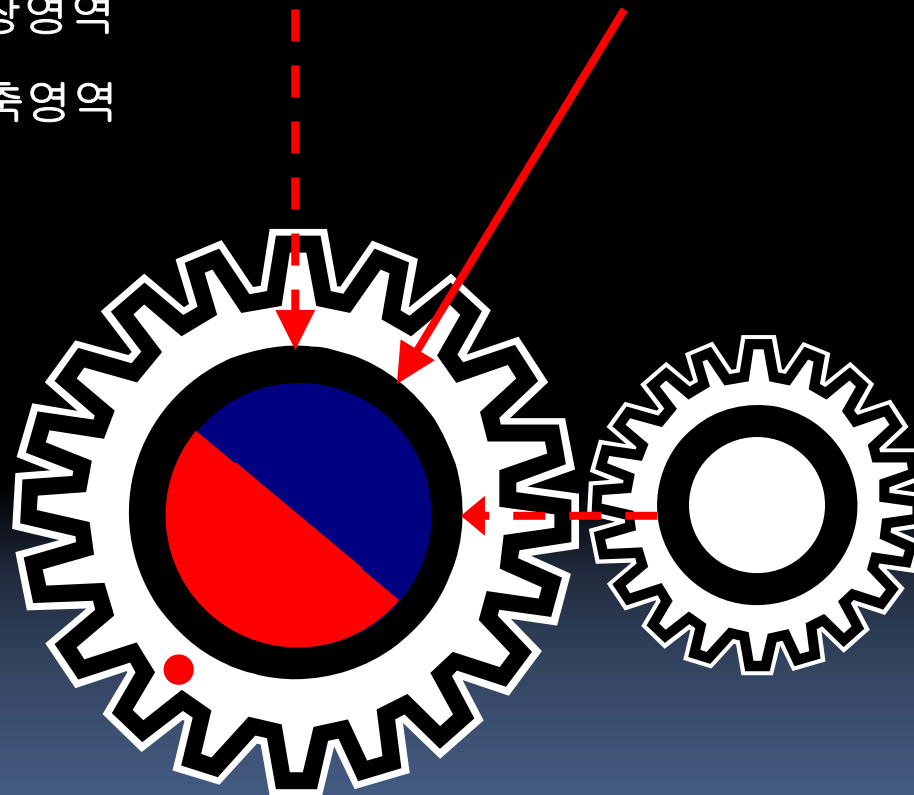
† 엔진은 하중을 고려 10t트럭의 엔진을 선정하였으며 토크는 1177Nm @ 1400rpm 이다.

(http://www.hyundai-motor.com/showroom/common/html/product/new_newpower/resource.aspx?tNum=0&carCode=2&eca=t6)

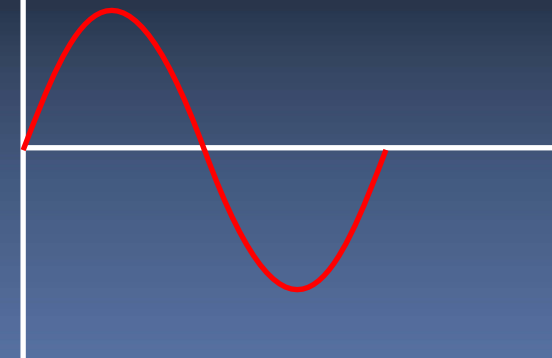
Data and Information Collection

- 축에는 일정한 비틀림과 양진굽힘이 작용한다.

인장영역
압축영역

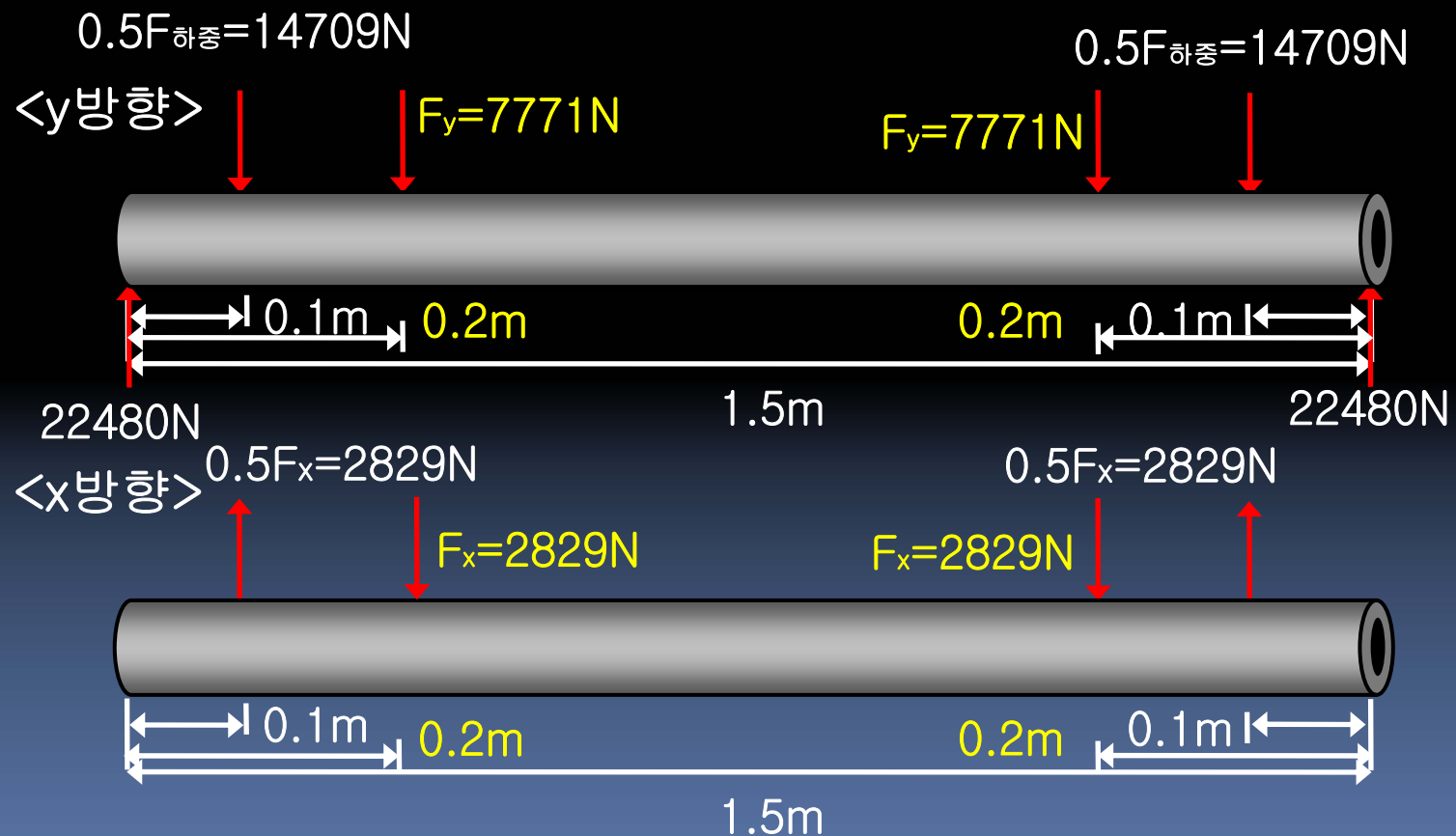


σ_a



Data and Information Collection

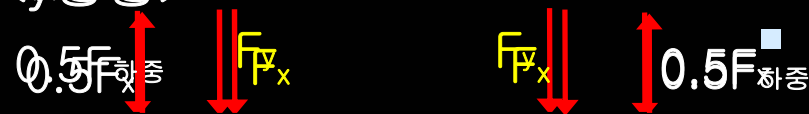
- 축에 작용하는 하중을 표현하면 다음과 같다.



Data and Information Collection

- 각 방향에 작용하는 $M_{\max}$ 를 구하면

<y방향>



$$M_{\max,y} = 3025 \text{ Nm}$$

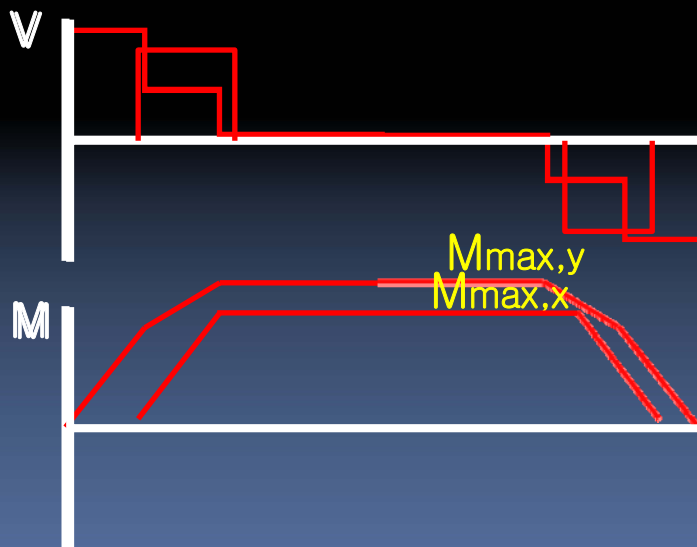
- $M_{\max,x} = 282.9 \text{ Nm}$ 이다.

$$\begin{aligned} M &= \sqrt{(M_{\max,y})^2 + (M_{\max,x})^2} \\ &= 3083.3 \text{ Nm} \end{aligned}$$

- 축식에 적용할 σ_a 를 구하면

$$\sigma_a = k * M * d_o / (\pi (d_o^4 - d_i^4) / 64)$$

$$= 32 * k * M * d_o / \pi (d_o^4 - d_i^4) \text{ 이다.}$$



Data and Information Collection

- 축식에 적용할 τ_m 을 구해보자.

전달받는 토크(T_m) = 1554Nm

$$\begin{aligned}\tau_m &= k * T_m * (d_o/2) / J \\ &= k * T_m * (d_o/2) / (\pi(d_o^4 - d_i^4) / 32) \\ &= 16 * k * T_m * d_o / \pi(d_o^4 - d_i^4)\end{aligned}$$

- 앞에서 구한 값을 축식에 적용하면 아래와 같다.

$$\left(N \frac{32kM_a d_o}{S_e \pi(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 + \left(N \frac{16\sqrt{3}kT_m d_o}{S_y \pi(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 \leq 1.$$

Data and Information Collection

- 축에는 반드시 베어링이 장착되는데 처짐각도가 0.04° 이상일 경우 가격이 비싼 자동조심베어링을 사용하여야 한다. 그러므로 처짐각은 0.04° 로 제한한다.
- 그리고 처짐량이 0.005in 이상의 경우
기어의 파손이 우려되므로 0.005in 보다 작아야 할 것이다.
처짐각도 및 처짐량식은 다음과 같다.

$$\theta = \int \frac{M}{EI} dz + C_3$$

$$\delta = \int \int \frac{M}{EI} dz + C_3 z + C_4$$

앞 식을 이용하면 x, y 각 방향의 처짐각, 량을 얻을 수 있다.

$$\delta_{\max,y} = -\frac{8.254 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)}, \theta_{\max,y} = \frac{2.0064 \times 10^{-7}}{(d_o^4 - d_i^4)}$$

$$\delta_{\max,x} = -\frac{4.482 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)}, \theta_{\max,x} = \frac{-3.3047 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)}$$

x, y 각 방향의 값을 구한후 앞의 모멘트처럼 벡터적으로 조합하면 총 처짐각도 및 처짐량을 구할 수 있다.

이 때 처짐각도는 축의 끝부분에서, 처짐량은 가운데에서 최대값이 나올 것이다.

Data and Information Collection

- 베어링 작용하중은 앞의 F_x, F_y 에 의해 발생한다.
 - $(14709^2 + 2829^2)^{0.5} = 14978.58\text{N}$ 이다.
- 요구수명, 축외경, 회전속도, 작용하중를 기반으로 베어링을 다음 표에서 선택할 수 있다.

†

BEARING NUMBER*	BOUNDARY DIMENSIONS						SNAP RING DIMENSIONS inches			MAX. FILLET RADIUS Shaft & Hsg. inch	APPROX. WEIGHT lb.	S_L	C	C_0
	BORE		O. DIAM.		WIDTH		H	S	t			LIMITING SPEED ‡ rpm	DYNAMIC LOAD RATING lb.	STATIC LOAD RATING lb.
	mm	inch	mm	inch	mm	inch								
6300	10	.3937	35	1.3780	11	.4331	.125	1.562	.044	.025	.13	22000	1400	850
6301	12	.4724	37	1.4567	12	.4724	.125	1.625	.044	.040	.15	20000	1700	1040
6302	15	.5906	42	1.6535	13	.5118	.125	1.821	.044	.040	.20	18000	1930	1200
6303	17	.6693	47	1.8504	14	.5512	.141	2.074	.044	.040	.25	16000	2320	1460
6304	20	.7874	52	2.0472	15	.5906	.141	2.276	.044	.040	.34	14000	3000	1930
6305	25	.9843	62	2.4409	17	.6693	.195	2.665	.067	.040	.58	11000	3800	2550
6306	30	1.1811	72	2.8346	19	.7480	.195	3.091	.067	.040	.83	9500	5000	3400
6307	35	1.3780	80	3.1496	21	.8268	.195	3.406	.067	.060	1.07	8500	5700	4000
6308	40	1.5748	90	3.5433	23	.9055	.226	3.799	.097	.060	1.41	7500	7350	5300

† Machine Design – An integrated Approach(3rd edition), Robert L. Norton,
Pearson Education, 615P에서 발췌

Identification/Definition of Design

19/25

variables

- d_o : 축의 외경 (m)
- d_i : 축의 내경 (m)

Cost function

20/25

$$\text{Costfunction} = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) L \cdot \rho \cdot C$$

Constraints

- G_1
$$\left(\frac{0.000445 d_o}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 + \left(\frac{0.000132446 d_o}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 - 1 \leq 0$$

- G_2
$$\sqrt{\left(\frac{2.0064 \times 10^{-7}}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 + \left(\frac{-3.3047 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2} - 0.0007 \leq 0$$

- G_3
$$\sqrt{\left(\frac{-8.254 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2 + \left(\frac{-4.482 \times 10^{-8}}{(d_o^4 - d_i^4)} \right)^2} - 0.000127 \leq 0$$

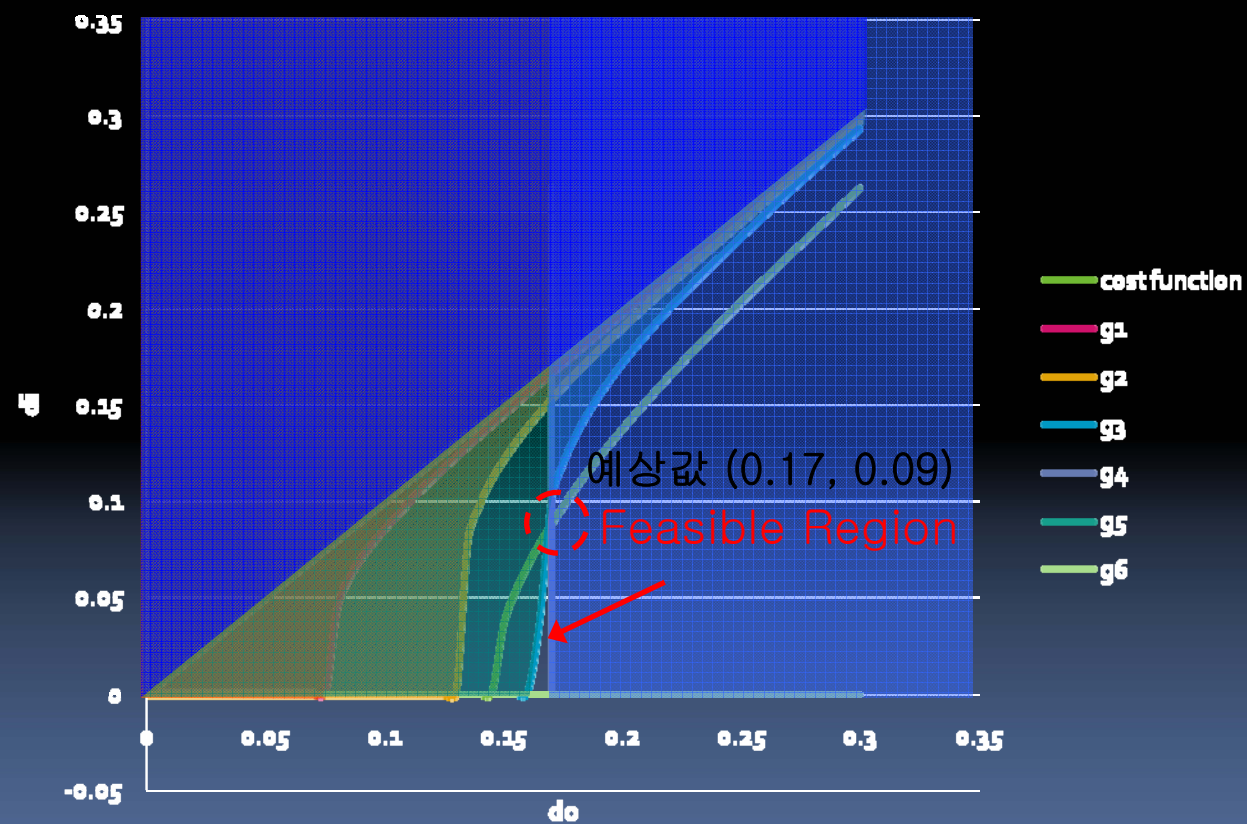
- G_4
$$d_o - 0.17 \leq 0$$

- G_5
$$d_i - d_o \leq 0$$

- G_6
$$-d_i \leq 0$$

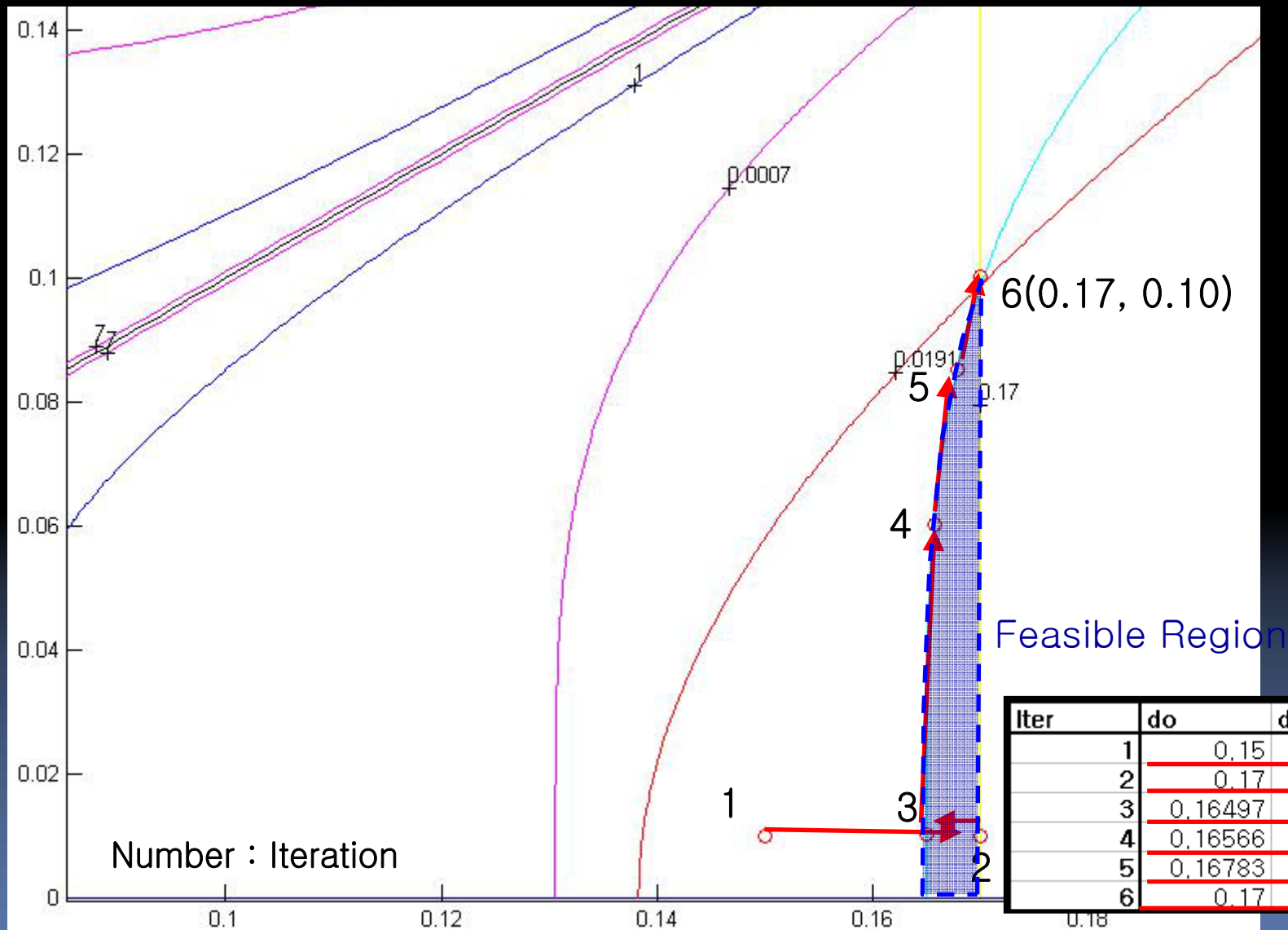
Optimization using Excel

22/25



Optimization using Excel

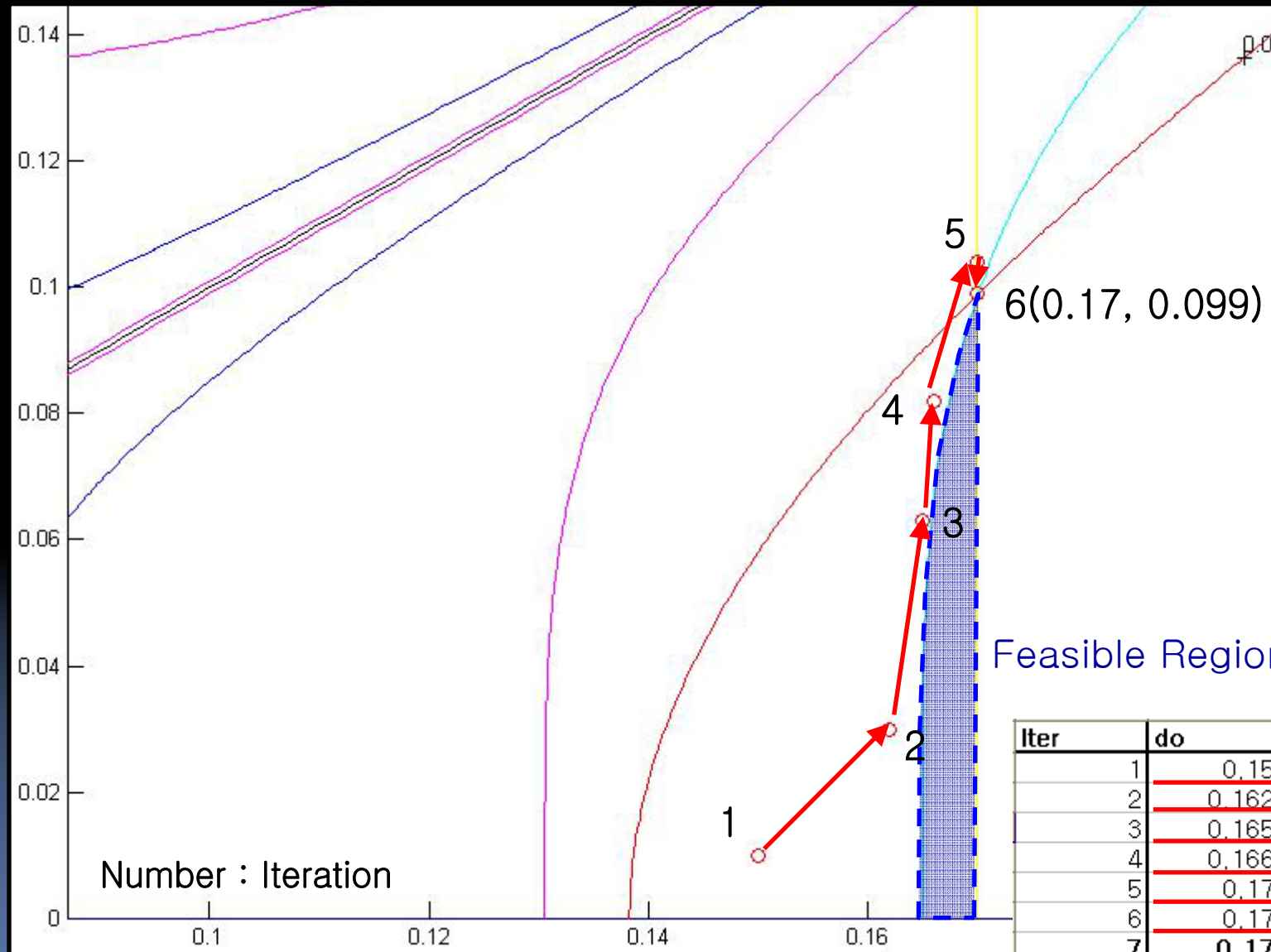
23/25



Iter	do	di	
1	0.15	0.01	
2	0.17	0.00999	
3	0.16497	0.01029	
4	0.16566	0.0629	
5	0.16783	0.08529	
6	0.17	0.10031	end

Optimization using MATLAB

24/25



Iter	do	di	
1	0.15	0.01	
2	0.162	0.03	
3	0.165	0.063	
4	0.166	0.082	
5	0.17	0.104	
6	0.17	0.099	
7	0.17	0.099	
8	0.17	0.099	end

Analysis of Frequency

■ 축의 횡진동 안전성 판단

$$\omega_n = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}} = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n (W_i/g) \delta_i}{\sum_{i=1}^n (W_i/g) \delta_i^2}} = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n W_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n W_i \delta_i^2}}$$

축의 1차 고유 진동수를 구하여 축의 회전수와 비교,
축의 횡진동에 대한 안전성을 판단

축의 각 속도 : 1060 rpm = 111 rad/s

기어가 설치된 부분의 처짐량 : 4.15e-5 m

기어의 무게 : 33.34N

축의 1차 고유 진동수 : 576 rad/s

횡진동 안전계수 = (1차 고유진동수) / (각 속도) = 5.2 <- 안전하다

Q & A