

그린에너지 시대의 도약 !

윈드타워 (Wind Tower)의 최적설계

조이름 : Windmill

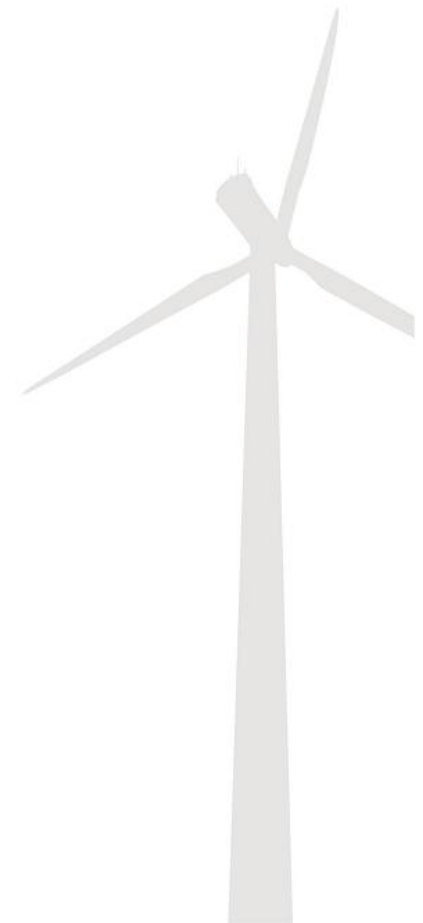
2004007542 박남해

2004007166 전경선

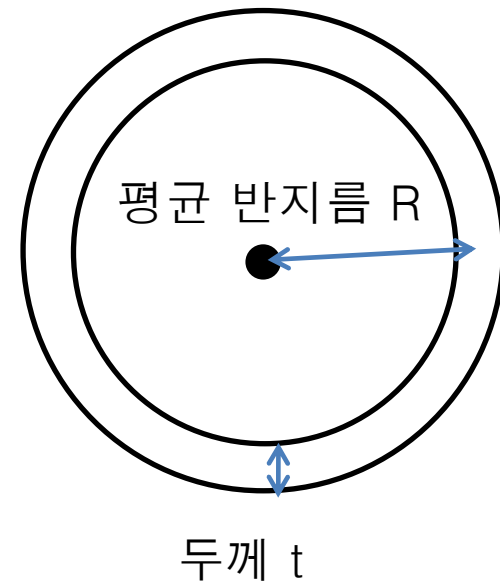
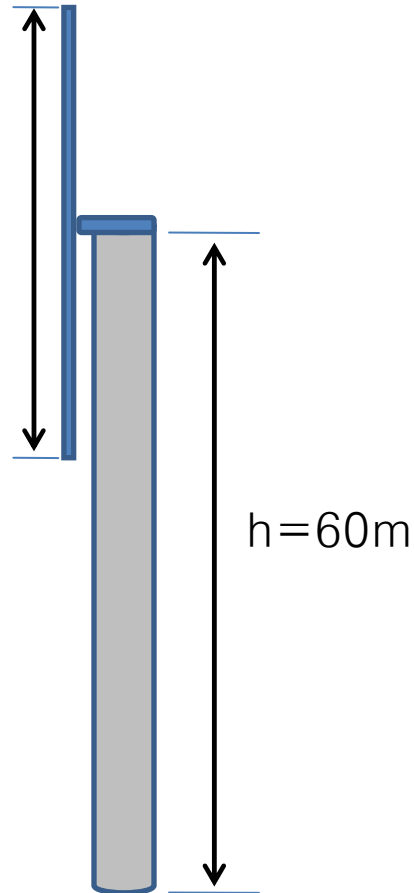
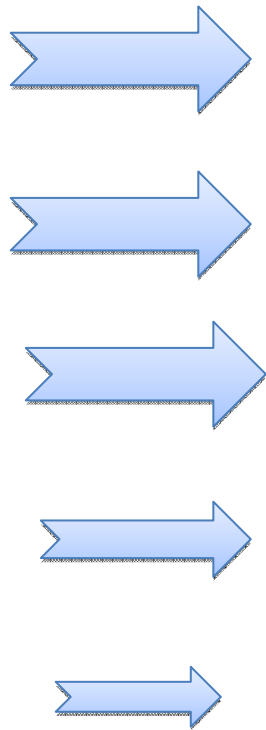


1. Problem Statement

- 제주도에 풍력발전단지를 설립할 예정입니다.
- 풍력발전기의 적절한 Wind turbine은 이미 선택하였고, 그에 따른 풍력발전타워 (wind tower)를 건설하고자 합니다.
- Wind tower의 단면은 속이 텅빈 원형 모형 (tubular)이며, 평균반지름 R 과 두께 t 로 표현되어 집니다.
- 선택한 Wind turbine의 사양에 맞는 윈드 타워의 높이 h 를 선택하였습니다. (지상으로부터 60m)
- 이 때 최악의 환경 속에서도 풍력발전기가 견딜 수 있도록 Wind tower를 설치하되, 최소의 질량으로 설계하시오.



날개지름 = 80 m



< Wind Tower 단면 >

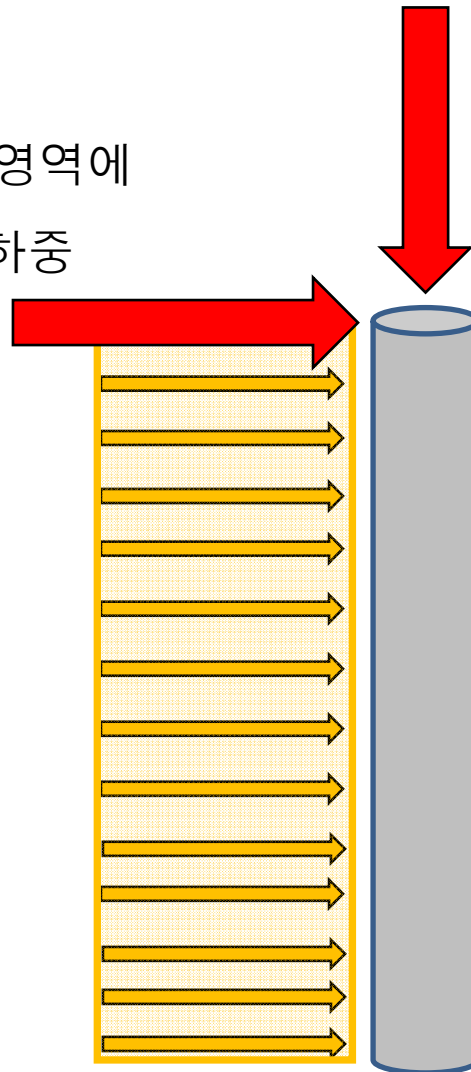
바람 : 제주지역 기본풍속 40 m/s

(건설교통부 의 건축구조 설계기준에 의거)

F2 : 날개의 회전영역에
작용하는 풍하중

F1 : Wind Turbine의 무게에
의한 압축력

F3 : Wind Tower에
작용하는 풍하중

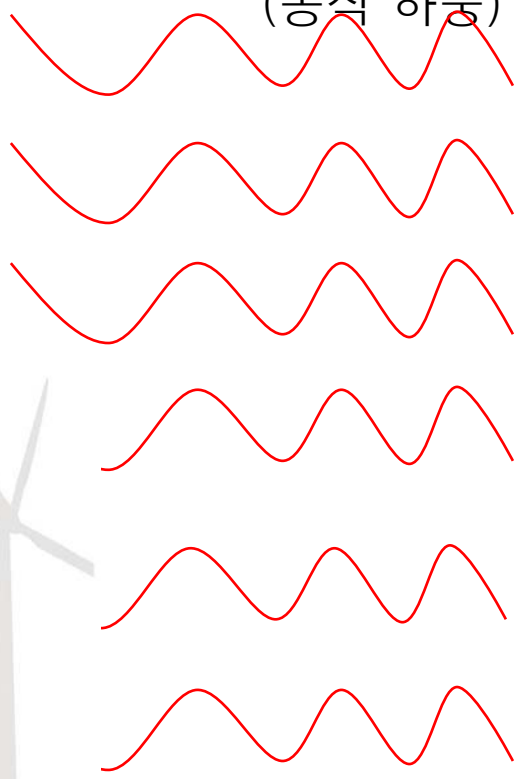


- Tower를 외팔보로 가정
(Fixed-free end
condition)
- 바람에 의한 공진효과 무시

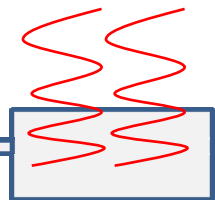
F1(rotor), F2(tower) :

풍력발전기에 전달되는 풍하중

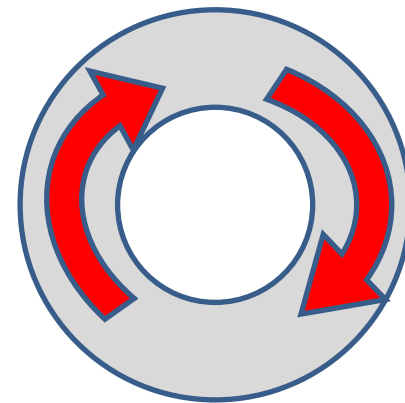
(동적 하중)

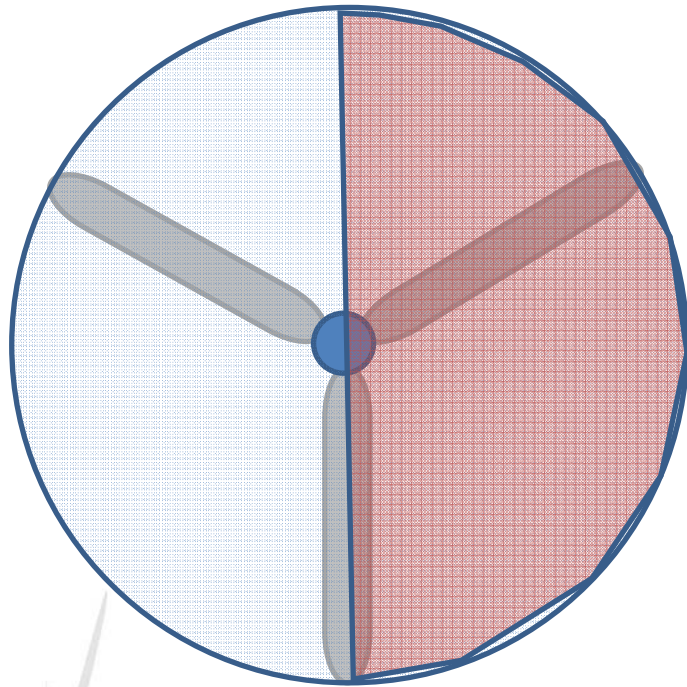


F3 : Wind Turbine 모터의
작동에 의한 진동



F1 : 날개에 불균일 하게
작용하는 풍하중으로 인해
Wind Turbine의 비틀림 진동



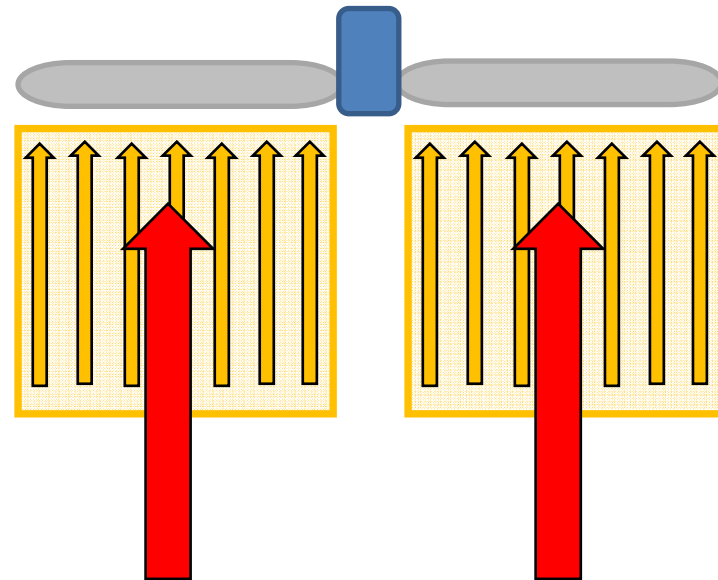


날개의 전체 영역 중
반쪽 영역에만 바람이 작용

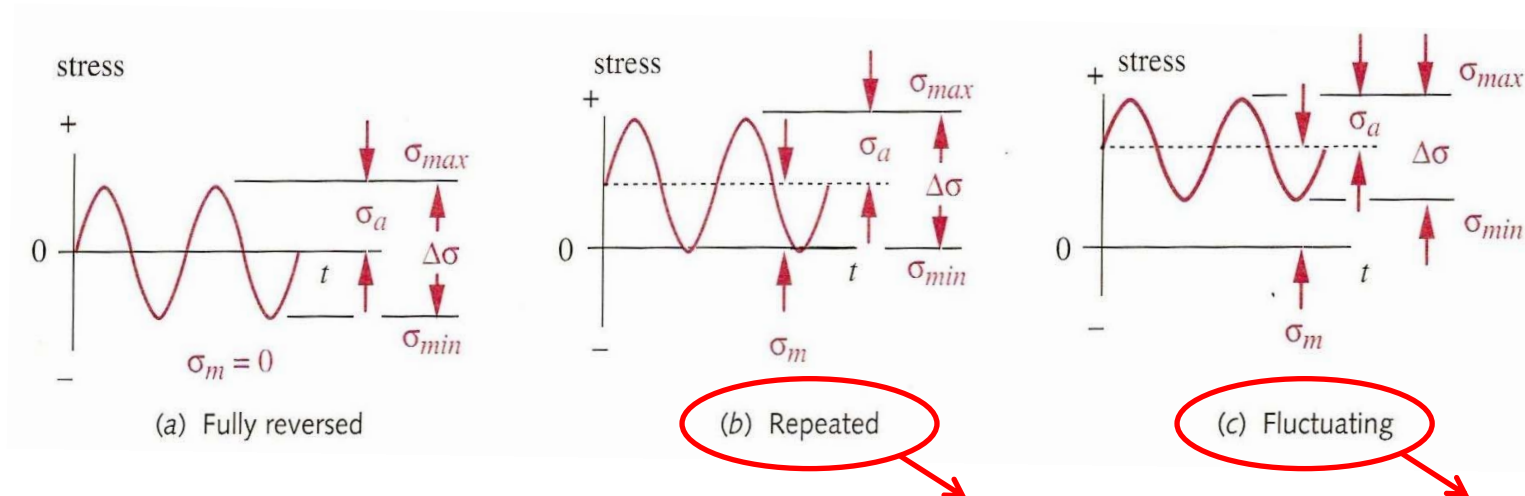
F1 : 날개에 불균일 하게

작용하는 풍하중으로 인해

Wind Turbine의 비틀림 진동



피로 하중 (Fatigue Load)



● 응력-수명 접근법 (Stress-Life Approach) 풍하중

로터의 진동

● 피로 파손에서 중요한 요인 :

- 부품이 받는 응력-시간 파형의 진폭과 평균값
- 응력 / 변형률의 총 반복횟수

(강재의 경우 재료가 내구한도의 응력수준 이하에 있을 때 $\rightarrow$ 무한 수명)

2. Data and Information Collection

- Wind tower material : ASTM A36 Steel, plate
Tensile Strength, Yield = 250 MPa = S_y
Ultimate Tensile Strength = 400 MPa = S_{ut}
Modulus of Elasticity = 200 GPa = E
Density(ρ) = 7.85 g/cm^3 , Even Material
(출처 : www.matweb.com)
- Wind turbine index : Germany NORDEX N80
Weight : 91.5 ton
Rotor Diameter : 80 m
(출처 : www.nordex-online.com)
- Safety Factor : 2
- Wind tower의 2차 단면모멘트(I) = $\pi R^3 t$



Wind Loading



풍압력

유효수압면적

	Input	Variable	Output	Unit	Comments
풍하중	40	Vo		m/s	기본풍속(제주도지방)
		Kzr	1.46078688		풍속고도분포계수
	1	Kzt			풍속할증계수
	0.95	Iw			중요도계수
		Vz	55.5099014	m/s	설계속도
	1.25	ρ_{air}		Ns ² /m ⁴	공기밀도
		qz	1925.84322	N/m ²	지표면 임의높이 Z에 대한 설계속도압
	1.2	Cf			풍력계수
	1.8	Gf			가스트 영향계수
		W_wind	4159.82136	N/m ²	풍압력
		A_t	480	m ²	타워의 유효수압면적
		A_r	5026.54825	m ²	로터회전면적
		P_t	1996714.25	N	타워가 받는 풍하중
		P_r	20909542.7	N	로터가 받는 풍하중

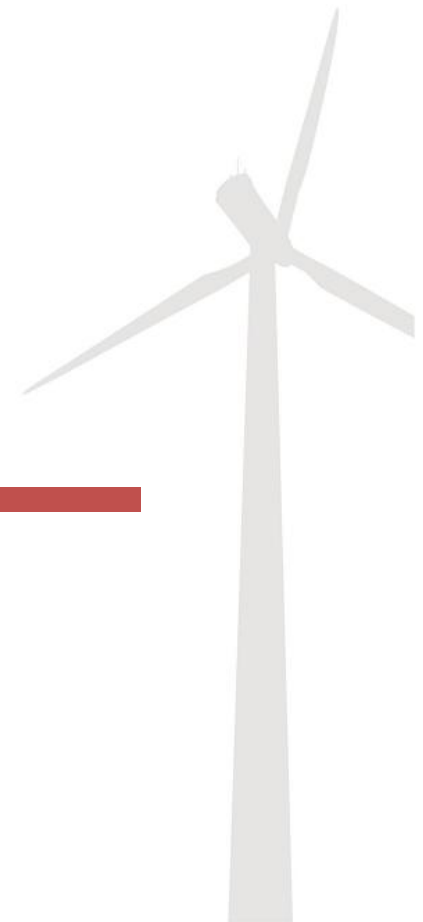
(출처 : 풍력공학입문, 건축구조설계기준(KBC2005))

3. Design variable

- Wind tower 의 평균 반지름 : R
- Wind tower 의 두께 : t

4. Objection Function

- Mass = $2\pi\rho hRt$

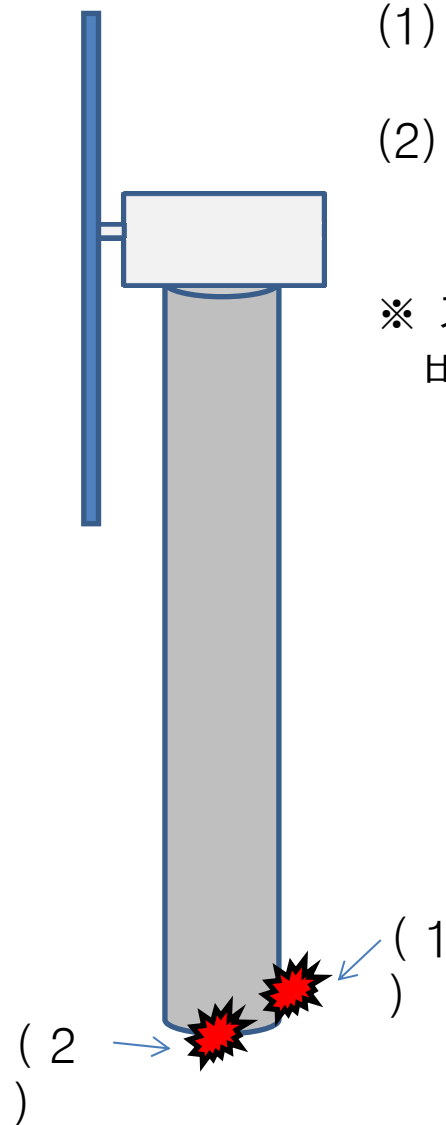


풍력발전기에 전달되는 풍하중
(동적 하중)

A diagram showing a circular flow with two red arrows indicating a clockwise cycle. The arrows are positioned on the left and right sides of a light gray circular area, pointing in a continuous loop.



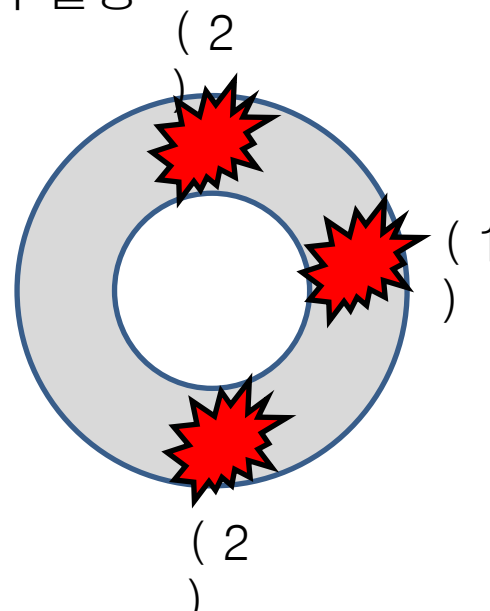
비틀림에 의한 전단응력



(1): 가장 큰 압축 굽힘응력 + 축하중의 압축응력 + 비틀림 전단응력

(2): 굽힘응력에 의한 전단응력 + 축하중의 압축응력 + 비틀림 전단응력

※ 가장 큰 비틀림 전단응력은 모두 원주의 바깥 둘레에서 발생



● 예상되는 취약 부분

applied load		Fmax_bending1	20909542.7	N	maximum applied load - bending1
		Fmax_bending2	1941073.61	N	maximum applied load - bending2
		Fmin_bending	0	N	minimum applied load - bending
		Fmax_axial	1269419	N	maximum applied load - axial
		Fmin_axial	525811	N	minimum applied load - axial
		Fmax_torsion	10454771.4	N	maximum applied load - torsion

von Mises effective Stress		σ'_a_1	83268718	N/m ²	von Mises alternating stress 1
		σ'_m_1	83365676.2	N/m ²	von Mises mean stress 1
		σ'_a_2	48524864.2	N/m ²	von Mises alternating stress 2
		σ'_m_2	48525169	N/m ²	von Mises mean stress 2

					bending
					- bending
					ding
					- axial
					il
					- torsion
					ion

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2}$$

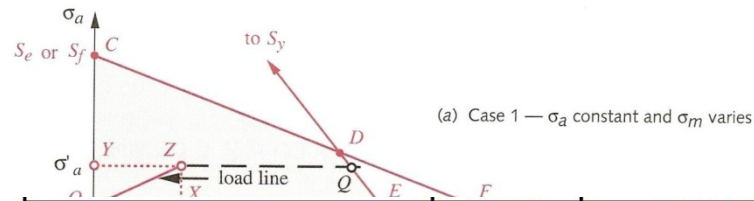
$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2}$$

$$F_a = \frac{F_{ma}}{A} \sigma'_{a1} = \sqrt{(\sigma_{a-bending} + \sigma_{a-axial})^2 + 3\tau_{a-torsion}^2}$$

$$\sigma_{bending} = \sigma'_{m1} = \sqrt{(\sigma_{m-bending} + \sigma_{m-axial})^2 + 3\tau_{m-torsion}^2}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{V}{A} \sigma'_{a2} = \sqrt{\sigma_{a-axial}^2 + 3(\tau_{a-bending} + \tau_{a-torsion})^2}, \sigma_m, \tau_a, \tau_m$$

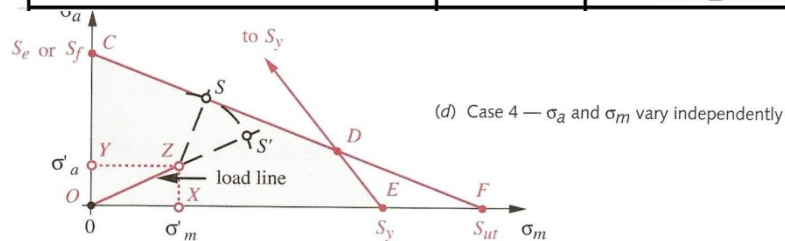
$$\tau_{bending} = \frac{\sigma'_{m2}}{A} = \sqrt{\sigma_{m-axial}^2 + 3(\tau_{m-bending} + \tau_{m-torsion})^2}$$



(a) Case 1 — σ_a constant and σ_m varies

$$N_f = \frac{S_y}{\sigma'_m} \left(1 - \frac{\sigma'_a}{S_y} \right)$$

	Input	Variable	Output	Unit	Comments
von Mises effective Stress		σ'_a_1	83268718	N/m ²	von Mises alternating stress 1
		σ'_m_1	83365676.2	N/m ²	von Mises mean stress 1
		σ'_a_2	48524864.2	N/m ²	von Mises alternating stress 2
		σ'_m_2	48525169	N/m ²	von Mises mean stress 2
Safety factor		Nsf_1@1	1.99999916	→ g1	FS for $\sigma_{alt} = \text{constant}$ @ 1
		Nsf_1@2	4.15197185	→ g2	FS for $\sigma_{alt} = \text{constant}$ @ 2
		Nsf_2@1	0.79181366		FS for $\sigma_{mean} = \text{constant}$ @ 1
		Nsf_2@2	1.50826196		FS for $\sigma_{mean} = \text{constant}$ @ 2
		Nsf_3@1	0.82772794		FS for $\sigma_{alt}/\sigma_{mean} = \text{constant}$ @ 1
		Nsf_3@2	1.42066551		FS for $\sigma_{alt}/\sigma_{mean} = \text{constant}$ @ 2
		Nsf_4@1	1.14403472		FS for $\sigma_{alt}, \sigma_{mean}$ vary independently @ 1
		Nsf_4@2	1.35184717		FS for $\sigma_{alt}, \sigma_{mean}$ vary independently @ 2



(d) Case 4 — σ_a and σ_m vary independently

$$ZS = \sqrt{(\sigma'_m - \sigma'_{m@S})^2 + (\sigma'_a - \sigma'_{a@S})^2}, \quad OZ = \sqrt{(\sigma'_a)^2 + (\sigma'_m)^2}$$

$$N_f = \frac{OZ + ZS}{OZ} = \frac{\sqrt{(\sigma'_a)^2 + (\sigma'_m)^2} + \sqrt{(\sigma'_m - \sigma'_{m@S})^2 + (\sigma'_a - \sigma'_{a@S})^2}}{\sqrt{(\sigma'_a)^2 + (\sigma'_m)^2}}$$

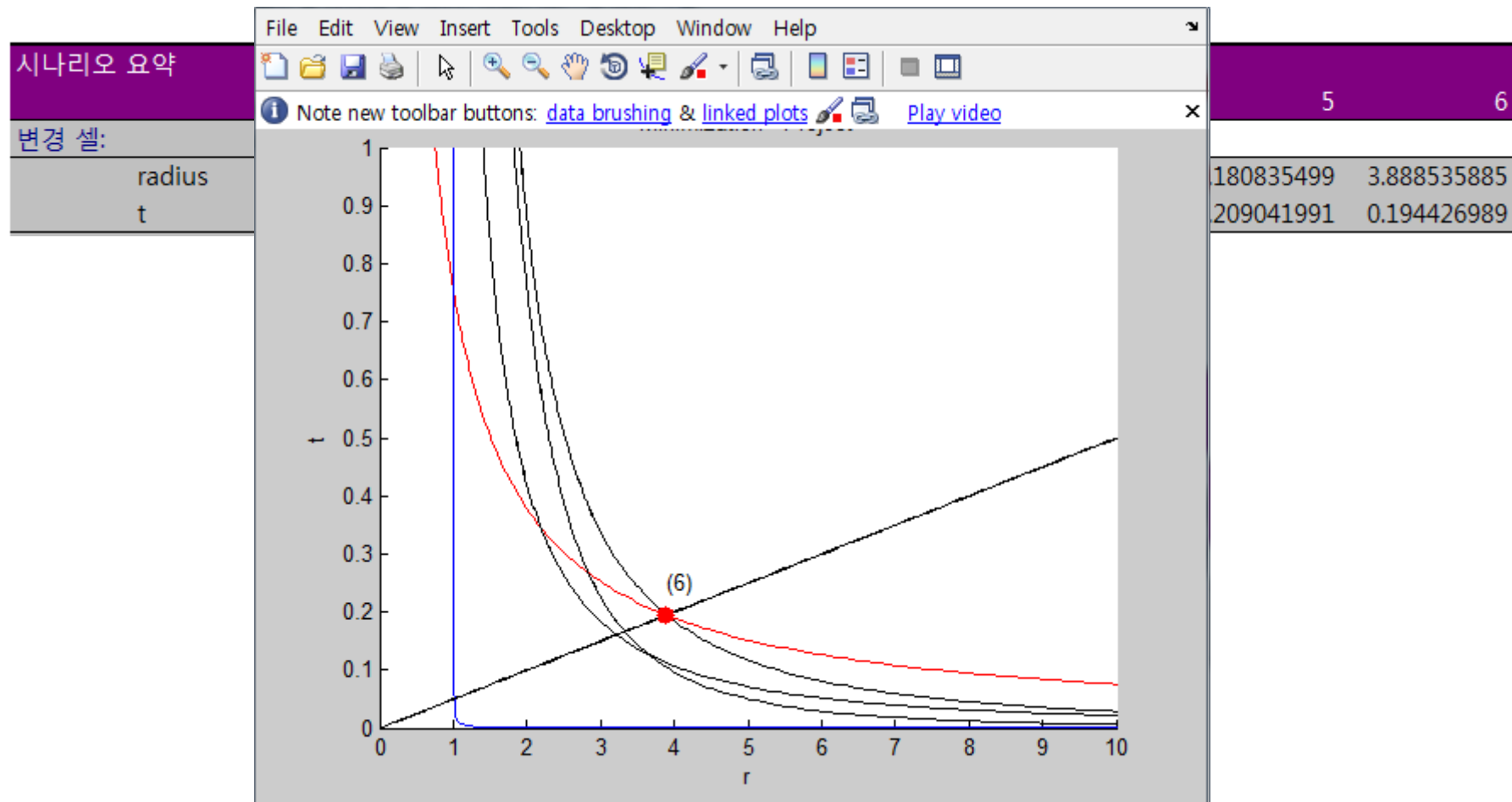
가능한 네 가지 하중변동 시나리오에 대한 수정 Goodman선으로부터의 안전계수 결정

	Input	Variable	Output	Unit	Comments
Buckling		k	2.74960989	m	radius of gyration
		I_{eff}	126	m	conservative value (Fixed-Free)
		S_r	45.8246825		slenderness ratio
		$(S_r)_D$	125.663706		
		P_{cr}	1108616966	N	Johnson region
			4465322616	N	Euler region
		Safety Factor	1235.06956		Buckling Safety factor (Johnson region)
			4974.6524	→ g3	Buckling Safety factor (Euler region)
Deflection		δ	0.2156763	m → g4	$\delta < 0.5m$
Tower	3.888536	R		m	타워반지름
	0.194427	t		m	타워두께
		R/t	20	→ g5	타워의 평균반지름과 두께의 비율
		A	4.75031085	m^2	타워단면적
	7.85E+03	ρ_{A36}		kg/m^3	A36의 밀도
	2.00E+02	E		GPa	A36의 modulus of elasticity
		I	35.9140341	m^4	타워단면관성모멘트
	250	S_y		MPa	A36의 항복강도
	60	l		m	타워높이
		Mass	2237.39641	ton	타워질량

Excel

■ 해찾기 (Excel solver)

초기값 : [7 0.9]



Matlab – fmincon

■ 초기값에 의한 영향

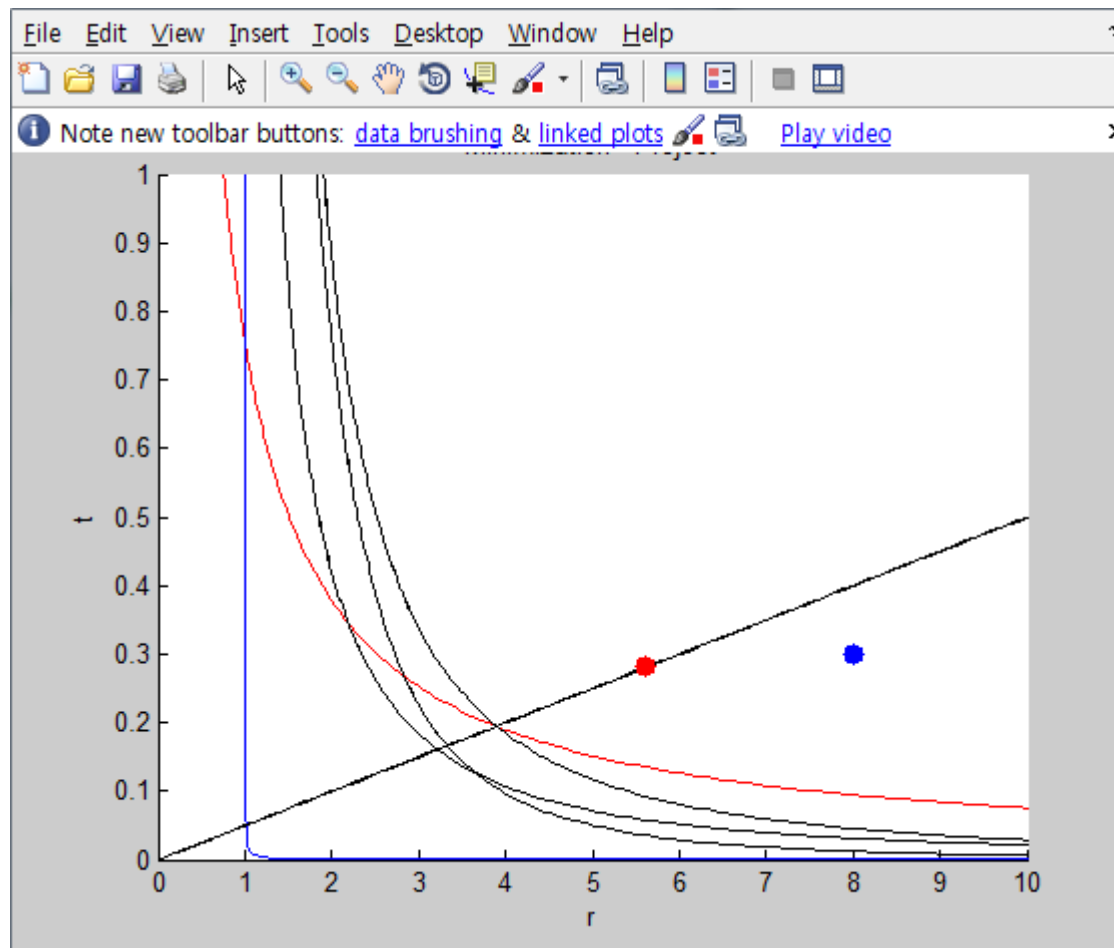
초기값 ([b t])	결과값 ([b t])
[1 0.3]	[5.177 0.379]
[2 0.3]	[3.897 0.195]
[3 0.3]	[3.898 0.195]
[4 0.3]	[3.898 0.195]
[5 0.3]	[4.221 0.211]
[6 0.3]	[4.643 0.232]
[7 0.3]	[5.142 0.257]
[8 0.3]	[5.613 0.281]

Matlab – fmincon

■ 초기값에 의한 영향

초기값 ([b t])	결과값 ([b t])
[1 0.3]	[5.177 0.379]
[2 0.3]	[3.897 0.195]
[3 0.3]	[3.898 0.195]
[4 0.3]	[3.898 0.195]
[5 0.3]	[4.221 0.211]
[6 0.3]	[4.643 0.232]
[7 0.3]	[5.142 0.257]
[8 0.3]	[5.613 0.281]

Matlab – fmincon



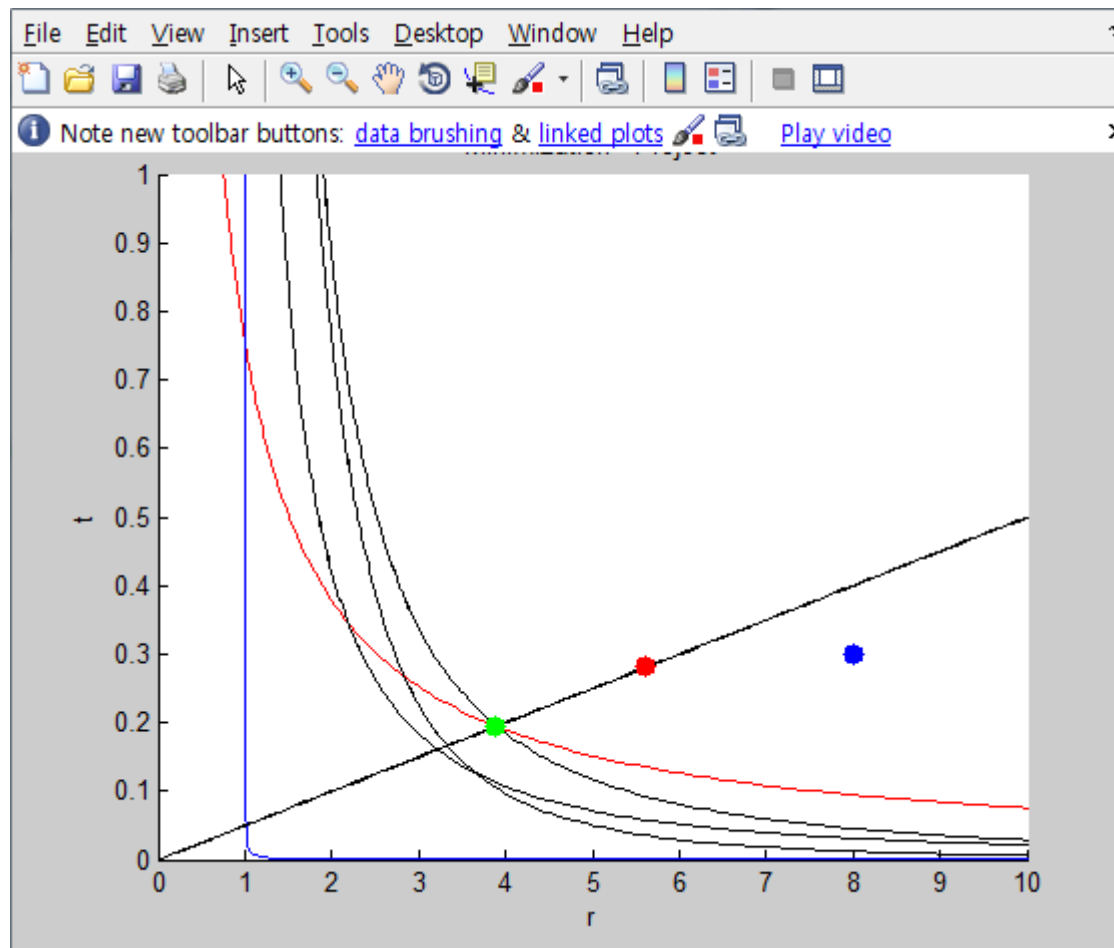
- 초기값
- Fmincon

Matlab – pattern search

■ 초기값에 의한 영향

초기값 ([b t])	결과값 ([b t])
[1 0.3]	[3.875 0.197]
[2 0.3]	[1.997 0.883]
[3 0.3]	[3.008 0.337]
[4 0.3]	[3.875 0.197]
[5 0.3]	[3.875 0.197]
[6 0.3]	[3.875 0.197]
[7 0.3]	[2.998 0.339]
[8 0.3]	[3.893 0.195]

Matlab – pattern search



- 초기값
- Fmincon
- Pattern search

Matlab – pattern search

■ Search method 에 의한 영향

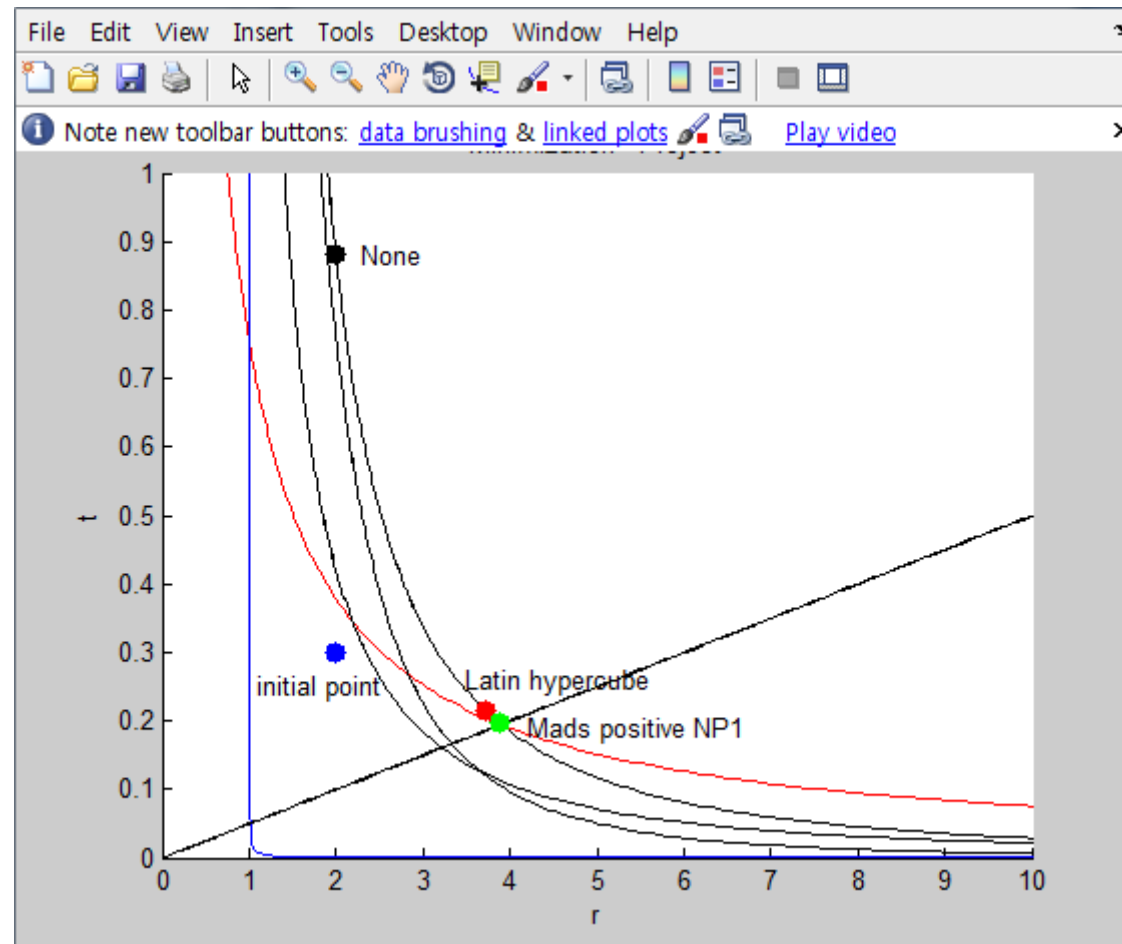
초기값 : [2 0.3] 으로 고정.

Method	결과값 ([b t])
None	[1.997 0.883]
GPS positive basis NP1	[1.997 0.883]
GPS positive basis 2N	[1.997 0.883]
MADS Positive basis NP1	[3.886 0.196]
MADS Positive basis 2N	[3.378 0.263]
Genetic Algorithm	[1.997 0.883]
Latin hypercube	[3.718 0.215]
Nelder–Mead	[2 0.3]

Matlab – pattern search

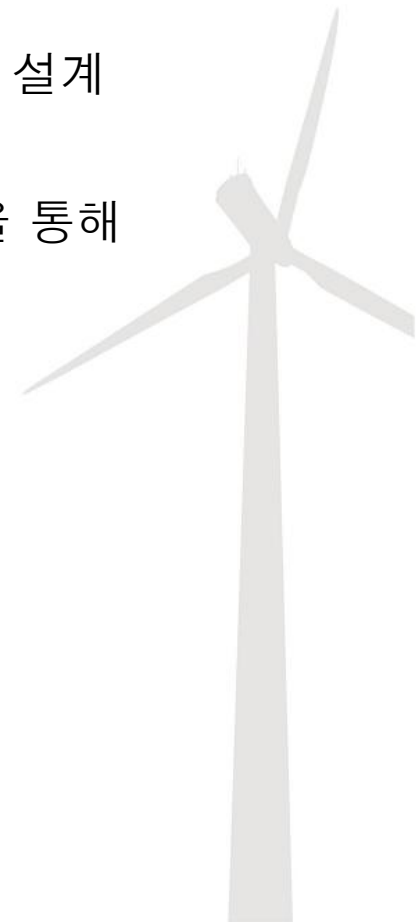
■ Search method 에 의한 영향

초기값 : [2 0.3] 으로 고정.



기존 설계와의 비교

- 무한 수명으로 설계 (실제 풍력터빈 수명 최소 20년 → 타워의 수명 최소 20년)
- 실제 타워의 하단은 땅속으로 매설
- 타워의 고유진동수를 계산하여 운전시 공진을 피하는 방향으로 설계
- 좌굴에 의한 붕괴의 위험이 있으므로 설계단계에서 좌굴 해석을 통해 타워 형상을 결정 (ex : cylindrical, upper segment conical)
- 타워의 높이가 50~60m 인 경우 타워의 평균 직경은 3~5m (기존 설계와 비교했을 때 직경이 좀 더 크게 나옴 (약 8m))
- 공진을 고려하고 좌굴 해석을 통해 적절한 타워 형상을 결정
→ 보다 개선된 최적해를 얻게 될 것이라 예상



결과 및 고찰

- 매틀랩의 fmincon, pattern search를 이용하여 최적해를 구할 때, 초기값의 영향을 크게 받는 문제점으로 인한 최적해의 신뢰성.
- 바람과 모터의 진동을 사인파로 모델링 한 것의 타당성.
(실제 바람의 풍속, 풍향은 일정하지 않고 항상 변화)
- $\frac{R}{t} \leq 20$ 구속조건에 목적함수가 큰 영향을 받아서 실제 설계와 차이점 발생.
(R/t 의 값을 작게 하면 최적해의 R 값은 작아지나 비용증가,
 R/t 의 값을 크게 하면 비용은 감소 하나 R 값이 커지고 두께 감소)
- 와류진동, 공기력 불안정 진동 등은 수치적으로 계산하는데 어려움이 있음.





The End...
Thank You