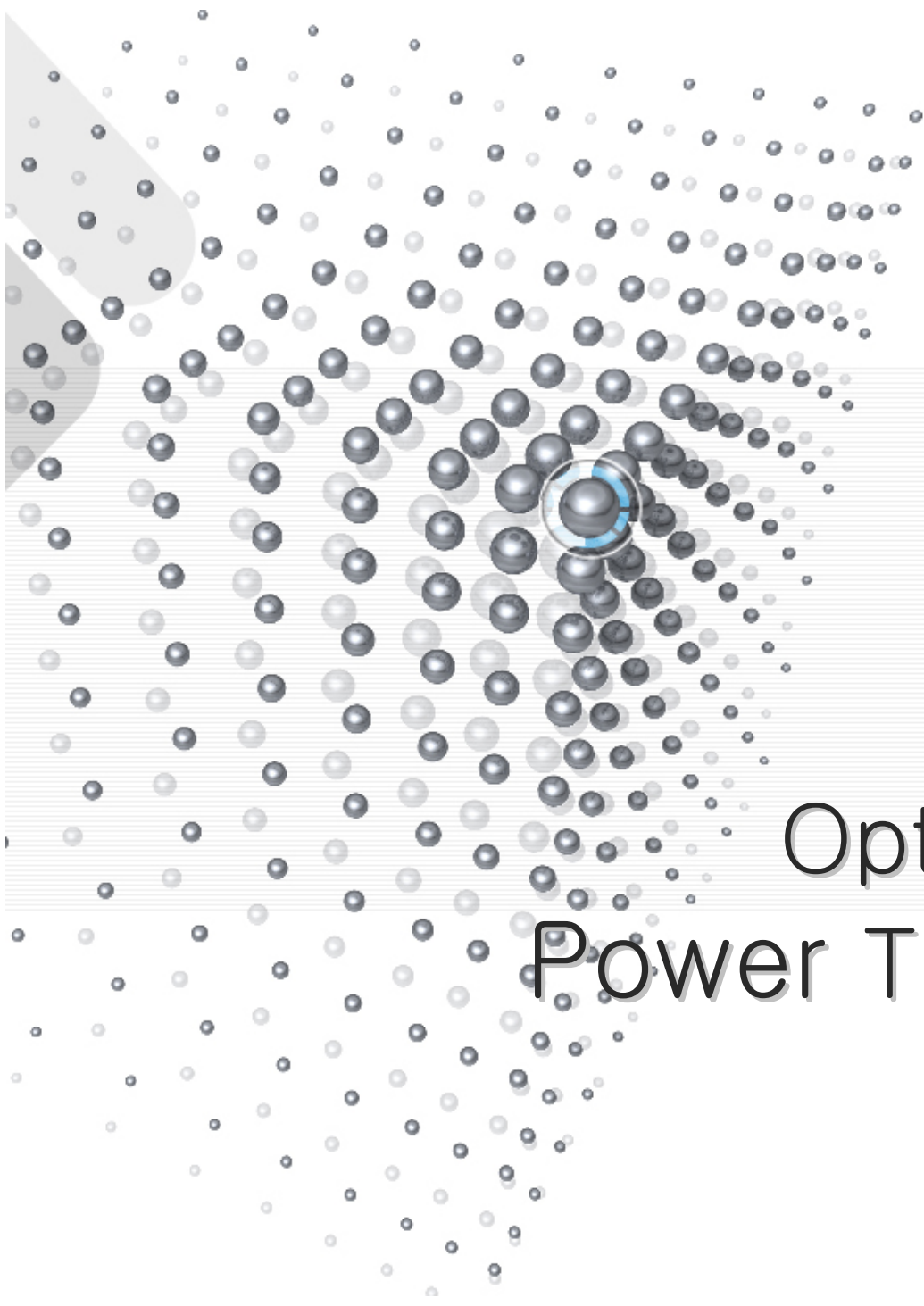




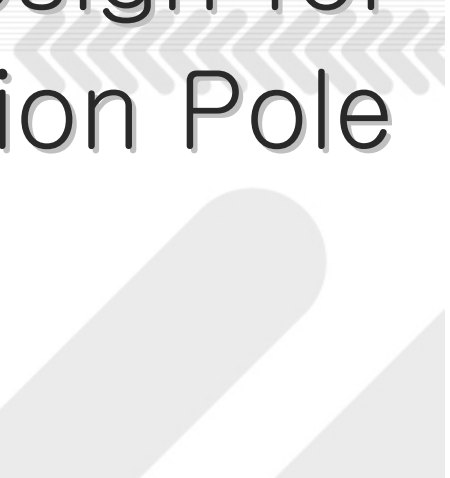
춤추는 전신주

- 장영식, 이진부, 심동현 -

07 . 12 . 13

Final term Presentation

Optimum Design for Power Transmission Pole





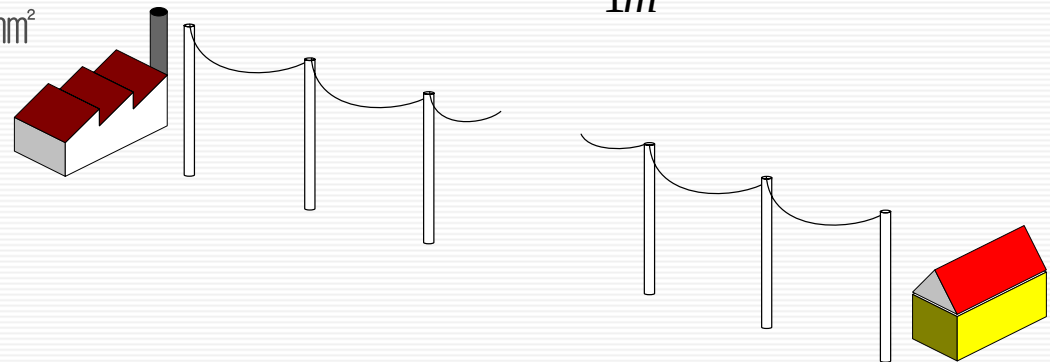
Contents

- Problem
- Verbal Statement
 - Definition of each terms
- Design Variables
- Objective Function
- Design Constraints
- Solution by GRG (by Excel)
- Solution by SQP & Patternsearch (by Matlab)
- Summary
- Comparing with current Design
- References



Problem

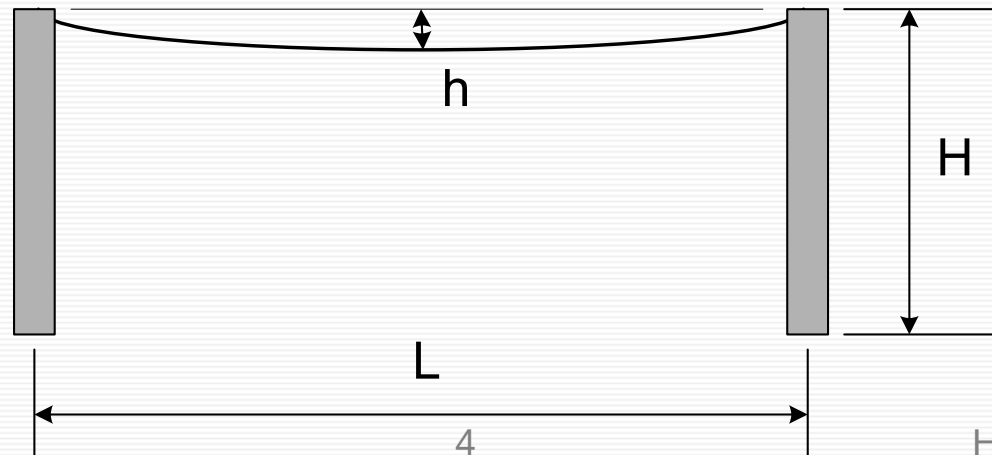
- the Power Transmission Pole Problem
- 30km 떨어진 마을을 잇는 송전선 및 전신주 개수 최적화
공급되는 전력 : 1MW
공급되는 전압 : 22.9kV
사용 재료 : 구리단선(항복강도 70MPa) [피복:PVC-5mm]
구리의 고유저항 : $1.72 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$
구리의 열팽창계수 : $16.5 [\mu m / m \cdot K]$
반지름에 따른 허용전류 : $I_{\max} \approx 37.7 A / mm \times r \times \frac{10^3 mm}{1m}$
전선 최소 단면적 : $60 mm^2$
허용 전력손실비 : 1%
전신주 높이 : 10m
허용 처짐비 : 1/10
허용 처짐량 : $H/5$





Verbal Statement

- 송전선의 질량과 전신주의 개수를 최소화
전선의 변형 무시(열, 인장), 피복의 강도 무시
기계적 요소 및 전기적 요소 동시에 고려
- 전체 전선에 대한 최적화는 복잡
⇒ 단위구간으로 나누어 해석 후 전체로 확장
⇒ 단위구간 : 두 전신주 간의 간격 L



Definition of Terms



중력 $g = 9.81m / s^2$

전선의 단가 $C_{wire} = 7\text{천원} / kg$

피복의 단가 $C_{pvc} = 2\text{천원} / kg$

전신주의 단가 $C_{pole} = 2,000\text{천원} / 개$

구리의 밀도 $\rho_{wire} = 8920kg / m^3$

피복의 밀도 $\rho_{pvc} = 1400kg / m^3$

마을과 발전소 간의 거리 $D = 30km = 30,000m$

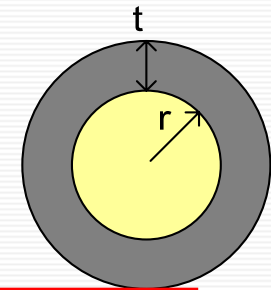
피복의 두께 $t = 5mm = 0.005m$

전신주의 높이 $H = 10m$

전선 $h [m]$

처짐량

전선의 반지름 $r [m]$



열에 의한 팽창

전선주간의 간격 $L = \frac{D}{N-1}$

전선의 길이 $S = L \left(1 + \frac{8}{3} n^2 \right) \times (1 + \alpha \Delta T)$

전선의 중량 $W = \pi \times g \times S \times [\rho_{wire} \times r^2 + \rho_{pvc} \times \{(r+t)^2 - r^2\}]$



- Hanyang University



Objective Function

- 설치비, 인건비 등 기타 요소 무시
- 재료비 최소화 $\Rightarrow$ 전선의 질량
 $\Rightarrow$ 전신주 개수 최소화

$$\text{total cost} = \pi \times S \times (N-1) \times [\rho_{\text{wire}} \times r^2 \times C_{\text{wire}} + \rho_{\text{pvc}} \times \{(r+t)^2 - r^2\} \times C_{\text{pvc}}] + N \times C_{\text{pole}}$$

- 각 Cost를 무시, 전선의 질량으로만 최적화
시 전신주에 대한 최적화 노력 가능

간격수

구리선
의 부피

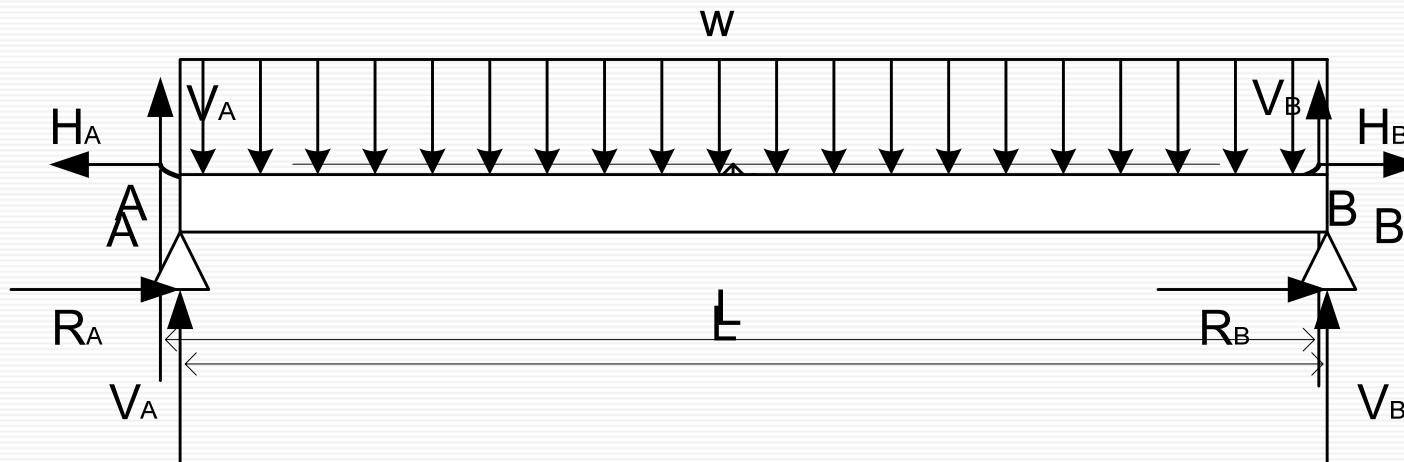
피복의
부피

Design Constraints



- 케이블의 일반정리

수직하중을 받는 케이블의 임의의 점 m 에서 케이블 내력(장력)의 수평성분 H 와, m 에서 케이블 현까지의 수직거리 h 를 곱한 값은 동일한 지간과 동일한 하중조건을 지지하는 단순보의 m 지점에서의 휨 모멘트와 같다





Design Constraints

- Mechanical Constraints

$$M_{\max} = \frac{wL^2}{8} = \frac{WL}{8}$$

$$V_A = V_B = \frac{W}{2} \quad H = \frac{M_{\max}}{h} = \frac{WL}{8h} = \frac{W}{8n}$$

$$T_{\max} = \sqrt{H^2 + V^2} = H\sqrt{1 + \frac{V^2}{H^2}} = H\sqrt{1 + 16n^2}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{T_{\max}}{A_{\text{wire}}} = \frac{T_{\max}}{\pi r^2} \leq \sigma_a = 70\text{MPa}$$

$$n = \frac{h}{L} \leq \frac{1}{10}$$

$$h \leq \frac{H}{5} = 2\text{m}$$

$$r \geq 0$$

$$h \geq 0$$

$$N \geq 2$$

g1

g8

g9

g5

g6

g7



Design Constraints

- Electrical Constraints

$$I_{\max} \approx 37.7 \text{ A/mm} \times \frac{10^3 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \times r \quad P = VI = 1 \text{ MW}$$

$$I_{\text{in}} = \frac{P}{V} = 43.67 \text{ A} \leq I_{\max} \quad \text{g2}$$

$$R = 1.72 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}] \times \frac{S \times (N-1)}{A_{\text{wire}}}$$

$$P_{\text{loss}} = I_{\text{in}}^2 \times R \leq 1 \text{ MW} \times \frac{1}{100} = 10^4 \text{ W} \quad \text{g3}$$

$$A_{\min} = 60 \text{ mm}^2 = 6.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \leq A_{\text{wire}} \quad \text{g4}$$

GRG by Excel Solver



g	9,81
rho_w	8920
rho_pvc	1400
C_w	7000
C_pole	2000000
C_pvc	2000
D	30000
t	0,005
H	10
처짐량 h	2
처짐비 n	0,021
전선길이 S	95,45235822
전선중량 W	1164,981035
전선주 간격 L	95,23809524
전선주 개수 N	316
전선 반지름 r	0,005625281
전체 비용	840127656,7

해 찾기 모델 설정

목표 셀(E):

해의 조건: ☐ 최대값(M) ☒ 최소값(N) ☐ 지정값(V):

값을 바꿀 셀(B):

제한 조건(U):

-
-
-
-
-
-

Buttons: 실행(S), 닫기, 옵션(O)..., 초기화(R), 도움말(H), 추정(G), 추가(A)..., 변경(C)..., 삭제(D)

Constraints			
g1	70000000	<=	70000000
g2	212,0731007	>=	43,67
g3	9920,960086	<=	10000
g4	9,94119E-05	>=	0,00006
g5	0,021	<=	0,1
g6	2	<=	2
g7	0,005625281	>=	0
g8	2	>=	0
g9	316	>=	2

Solution	
전선주의 개수	316개
전선의 처짐량	2m
전선의 반지름	5.6mm
총 원재료비	8억 4천만원



Answer Report



목표 셀 (최소값)

셀	이름	계산 전의 값	계산 값
\$C\$19	전체 비용	1022154635	840127656.7

값을 바꿀 셀

셀	이름	계산 전의 값	계산 값
\$C\$12	처집량 h	0.5	2
\$C\$17	전신주 개수 N	200	316
\$C\$18	전선 반지름 r	0.01	0.005625281

제한 조건

셀	이름	셀의 값	수식	만족 정도	조건과의 차
\$C\$22	g1	70000000	\$C\$22<=\$E\$22	만족	0
\$C\$25	g4	9.94119E-05	\$C\$25>=\$E\$25	부분적 만족	3.94119E-05
\$C\$24	g3	9920.960086	\$C\$24<=\$E\$24	부분적 만족	79.03991354
\$C\$23	g2	212.0731007	\$C\$23>=\$E\$23	부분적 만족	168.4031007
\$C\$26	g5	0.021	\$C\$26<=\$E\$26	부분적 만족	0.079
\$C\$27	g6	2	\$C\$27<=\$E\$27	만족	0
\$C\$28	g7	0.005625281	\$C\$28>=\$E\$28	부분적 만족	0.005625281
\$C\$30	g9	316	\$C\$30>=\$E\$30	부분적 만족	314
\$C\$29	g8	2	\$C\$29>=\$E\$29	부분적 만족	2
\$C\$17	전신주 개수 N	316	\$C\$17=정수	만족	0

Scenario Report



20	21	22	23	24	25	26	27
2	2	2	2	2	2	2	2
316,236386	316	316	316	316	316	316	316
0,005603111	0,005603111	0,055603111	0,030603111	0,009175503	0,006074782	0,005898486	0,005729523
839073911,9	838600775,5	19020776090	6243394168	1159437984	872335567,3	859419434,8	847384560,5

초기값을 $h=0.5$, $N=200$, $r=0.01$ 으로 하여
계산하니 Iteration 횟수 27번째에 수렴한다.

Scenario Report



1	2	3	4	5
10	38,79725468	30,40864668	28,88821435	28,16600899
10	74	74	74	74
10,00001	10,00453217	10,00453217	10,00453217	10,00453217
5.89156E+14	6.0369E+14	5.98284E+14	5.97445E+14	5.97061E+14

초기값을 $h=10$, $N=10$, $r=10$ 으로 하여
계산하니, 목적함수가 훨씬 큰 값으로 수렴했다.

SQP – fmincon by matlab

```
>> [x fval exitflag output] = fmincon(@myfun,[200 0.001 0.5],[],[],[],[],[2 0 0],[],@mycon,options)
```

초기치
N = 200 , r = 0.01
h = 0.5

Lower
Bound

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	4	4.15402e+008	3.162e+009				Infeasible start point
1	7	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	
2	10	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
3	13	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
4	16	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
5	19	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
6	22	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
7	25	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
8	28	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
9	31	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
10	34	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
11	37	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
12	40	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
13	43	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
14	46	4.15402e+008	3.162e+009	2	-2.61e+008	3.96e+008	Hessian not updated
15	51	4.11068e+008	5.499e+009	0.5	2.43e+008	1.2e+010	Hessian not updated
16	55	2.18303e+008	1.398e+013	1	-1.93e+008	3.06e+009	
17	59	2.18409e+008	6.991e+012	1	1.06e+005	9.29e+007	
18	63	2.19399e+008	3.097e+012	1	9.9e+005	1.31e+007	
19	67	2.20894e+008	1.377e+012	1	1.5e+006	5.89e+007	
20	71	2.23137e+008	6.118e+011	1	2.24e+006	9.36e+007	
21	75	2.26501e+008	2.719e+011	1	3.36e+006	1.49e+008	
22	79	2.31546e+008	1.208e+011	1	5.04e+006	2.35e+008	
23	83	2.3911e+008	5.368e+010	1	7.56e+006	3.71e+008	

24	87	2.50447e+008	2.384e+010	1	1.13e+007	5.85e+008
25	91	2.67417e+008	1.058e+010	1	1.7e+007	9.19e+008
26	95	2.92757e+008	4.683e+009	1	2.53e+007	1.42e+009
27	99	3.30376e+008	2.064e+009	1	3.76e+007	2.14e+009
28	103	3.85509e+008	8.994e+008	1	5.51e+007	2.98e+009
29	107	4.64002e+008	3.824e+008	1	7.85e+007	3.31e+009
30	111	5.68761e+008	1.536e+008	1	1.05e+008	1.01e+009
31	115	6.90026e+008	5.394e+007	1	1.21e+008	7.45e+009
32	119	7.93427e+008	1.363e+007	1	1.03e+008	1.75e+010
33	123	8.40654e+008	1.506e+006	1	4.72e+007	9.72e+009
34	127	8.47264e+008	2.357e+004	1	6.61e+006	4.89e+008
35	131	8.4737e+008	5.974	1	1.07e+005	3.86e+005
36	135	8.4737e+008	2.235e+007	1	27.1	5.97
37	139	8.4737e+008	1.49e+008	1	9.1e+007	0.0198 Hessian modified twice

Optimization terminated: magnitude of search direction less than 2*options.TolX
and maximum constraint violation is less than options.TolCon.
Active inequalities (to within options.TolCon = 1e-006):

lower	upper	ineqlin	ineqnonlin
			1
			3
			6

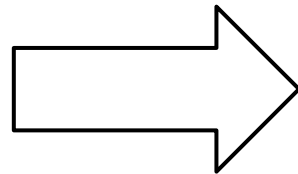
SQP – fmincon by matlab

```
x =  
      I  
    316.2364    0.0056    2.0000
```

```
fval =  
  
    8.4737e+008
```

```
exitflag =  
  
      4
```

```
output =  
  
    iterations: 37  
    funcCount: 139  
    lssteplength: 1  
    stepsize: 5.2728e-013  
    algorithm: 'medium-scale: SQP, Quasi-Newton, line-search'  
    firstorderopt: 3.1872e-006  
    message: [1x142 char]
```



Solution

전신주의 개수	341개
전선의 반지름	5.6 [mm]
전선의 처짐량	2 [m]
총 원재료비	8억 4700만원

SQP – Another Initial Point

```
>> [x_T fval exitflag output] = fmincon(@myfun, [10 10 10], [], [], [], [], [2 0 0], [], @mycon, options)
```

x =

316.2364 0.0056 2.0000

fval =

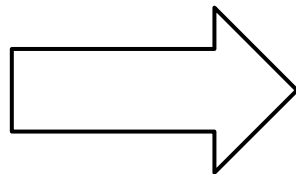
8.4737e+008

exitflag =

4

output =

iterations: 103
funcCount: 367
lssteplength: 1
stepsize: 4.8359e-010
algorithm: 'medium-scale: SQP, Quasi-Newton, line-search'
firstorderopt: 3.1872e-006
message: [1x142 char]



초기치
N = 10 , r = 10
h = 10

Solution

앞의 결과와 동일

전신주의 개수

341개

전선의 반지름

5.6 [mm]

전선의 처짐량

2 [m]

총 원재료비

8억 4700만원

Patternsearch by matlab

```
>> [x fval exitflag output] = patternsearch(@myfun,[200 0.01 0.5],[],[],[],[],[2 0 0],[],@mycon,options)
```

초기치
 $N = 200$, $r = 0.01$
 $h = 0.5$

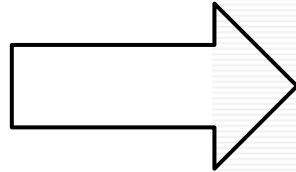
Lower
Bound

				Constraint	MeshSize	Method
3	5453	1.38552e+011		0	1e-006	
4	7053	1.51006e+010		0	0.001	Increase
5	8984	3.07863e+009	9.984e-007	0	1e-005	Increase penalty
6	10226	1.03334e+009	1e-006	0	1e-007	Increase penalty
7	11392	8.50114e+008	1e-006	0	1e-009	Increase penalty
8	12360	8.47398e+008	1e-006	0	1e-011	Increase penalty
					1e-013	Increase penalty
					1e-015	Increase penalty
					2.22e-016	Increase penalty

Optimization terminated: norm of the step is less than 2.22045e-016
and constraints violation is less than options.TolCon.

Patternsearch by matlab

```
x =  
    316.2500    0.0056    2.0000  
  
fval =  
    8.4740e+008  
  
exitflag =  
         4  
  
output =  
  
    function: @myfun  
    problemtype: 'nonlinearconstr'  
    pollmethod: 'gpspositivebasis2n'  
    searchmethod: []  
    iterations: 8  
    funccount: 12360
```



Solution	fmincon과 동일
전신주의 개수	341개
전선의 반지름	5.6 [mm]
전선의 처짐량	2 [m]
총 원재료비	8억 4700만원

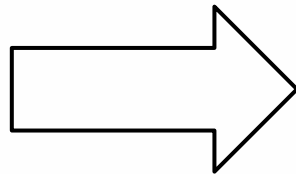
Patternsearch

– Another Initial point

✓ 초기값을 $N = 10$, $r = 10$, $h = 10$ 으로 할 때

```
>> [x fval exitflag output] = patternsearch(@myfun,[10 10 10],[1],[1],[1],[1],[2 0 0],[1],@mycon,options)
```

```
x =  
323.3088    0.0056    2.0000  
  
fval =  
8.6154e+008  
  
exitflag =  
4  
  
output =  
  
    function: @myfun  
    problemtype: 'nonlinearconstr'  
    pollmethod: 'gpspositivebasis2n'  
    searchmethod: []  
    iterations: 8  
    funccount: 12933
```



Solution	전신주 개수 달라짐
전신주의 개수	323개
전선의 반지름	5.6 [mm]
전선의 처짐량	2 [m]
총 원재료비	8억 4700만원

Genetic Algorithm

File Help

Problem Setup and Results

Fitness function: @myfun

Number of variables: 3

Constraints:

Linear inequalities: A = b =

Linear equalities: Aeq = beq =

Bounds: Lower = [2 0 0] Upper =

Nonlinear constraint function: @mycon

Plots

Plot interval: 1

☐ Best fitness ☐ Best individual ☐ Distance

☐ Expectation ☐ Genealogy ☐ Range

☐ Score diversity ☐ Scores ☐ Selection

☐ Stopping ☐ Max constraint

☐ Custom function:

Run solver

☐ Use random states from previous run

Current generation: 75

Status and results:

GA terminated,
Fitness function value: 4.2205828360943634E10
Optimization terminated: stall time limit exceeded

Final point:

1	2	3
19991.82886	0.01681	0.45069

Solution 수렴하지 않음

전신주의 개수 19991개

전선의 반지름 1.681 [mm]

전선의 처짐량 0.45 [m]

총 원재료비 42억 2050만원



Genetic Algorithm
&
Simulated Annealing
사용 불가



Summary

- 발전소와 마을을 잇는 송전선 및 전신주 최적화
- 문제 선정 기준 : 실용성, 다양성
 - 실제 주변에서 찾아볼 수 있는 문제
 - 단순한 기하학적 설계 보다 다양한 배경지식을 요구하는 문제
 - ⇒ 기계적인 요소, 전기적인 요소
- 설계 변수 : 전신주 개수 N , 전선의 반경 r , 전신주 처짐량 h
- 각각의 단가를 고려치 않을 경우 전신주에 대한 최적화 누락가능
- Excel Solver & matlab 함수를 이용한 다양한 기법 사용



Comparing with current Design

- Active constraints : 전선에 걸리는 응력에 관한 식
전선에 처짐량에 대한 제한
 - 송전에 가장 중요한 요소로 적합함
- 실제 설계에 비해서 가격이 상당히 절약
(전신주의 개수를 대폭 줄임)
 - 열에 의한 영향을 고려하기는 하였지만
원래 전류와 저항 그리고 온도와는 복잡한 관계
하지만 단순화로 인한 전선의 처짐이 작아짐
- 보다 나은 설계를 위해서
 - 열에 의한 영향 보다 정밀히 검토
 - 중간에 배전소를 고려하여 세분화해서 모델링

References

- Design of Building Structures
 - Schueller (Prentice hall)
- 재료 및 구조 역학
 - 임청권 (예문사)
- 전기철도 시스템 공학
 - 강인권 (성안당.com)
- 전기철도 구조물 공학
 - 김양수, 유해출 (동일)
- 전기용어 사전
- Internet Search



Questions and Answers



Please,

Don't hesitate to ask anything

about my Presentation!



Thank You