Size Optimization

Computational Design Laboratory
Department of Automotive Engineering
Hanyang University, Seoul, Korea

OUTLINE

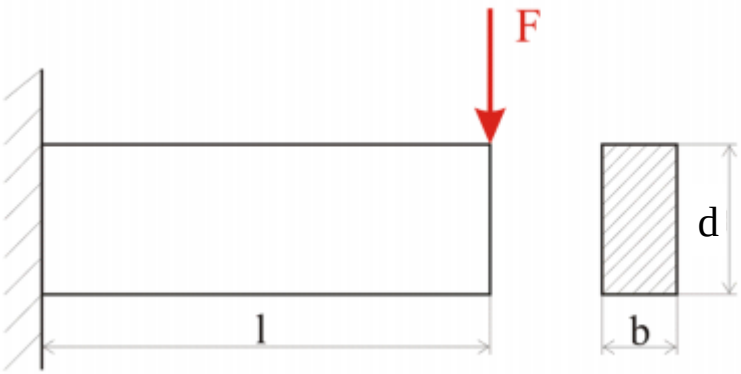
- **Lecture Goals**
  - ✓ Bar truss 구조의 부피 최소화 문제 및 위상 최적화와 결합한 설계 문제의 치수 최적화를 수행하고 제약 조건에 따른 설계 결과를 분석한다.

- **Contents**
  - ✓ Beam design problem using Matlab
  - ✓ 5 bar truss 구조 치수 최적화
    : volume minimization problem
  - ✓ 3 bar truss 구조 치수 최적화
    : topology + size optimization

- 해석 프로세스
  - Geometry 생성
  - Materials and properties
  - Mesh 생성
  - Load collectors-boundary conditions 설정
  - Load collectors-load 설정
  - Load steps 정의
  - 최적설계 문제 정식화 및 최적설계 실행
  - 후처리

BEAM DESIGN PROBLEM USING MATLAB

예제: BEAM DESIGN PROBLEM



$$M = 40\ \text{kN}\cdot\text{mm}$$
$$V = 150\ \text{kN}$$
$$(\sigma_a)_{bending} = 10\text{MPa}$$
$$(\tau_a)_{shear} = 2\text{MPa}$$

$$\underset{b,d}{\text{Minimize}}\ \text{mass}$$

subject to

$$\begin{cases} g_1 = \sigma(b,d) \le (\sigma_a)_{bending} \\ g_2 = \tau(b,d) \le (\tau_a)_{shear} \\ g_3 = d \le 2b \\ g_4 = b \ge 0 \\ g_5 = d \ge 0 \end{cases}$$

$$\underset{b,d}{\text{Minimize}}\ f = bd$$

subject to

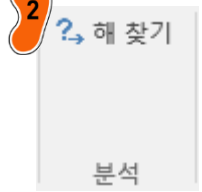
$$\begin{cases} g_1 = \dfrac{6M}{bd^2} - (\sigma_a)_{bending} \le 0 \\ g_2 = \dfrac{3V}{2bd} - (\tau_a)_{shear} \le 0 \\ g_3 = d - 2b \le 0 \\ g_4 = -b \le 0 \\ g_5 = -d \le 0 \end{cases}$$

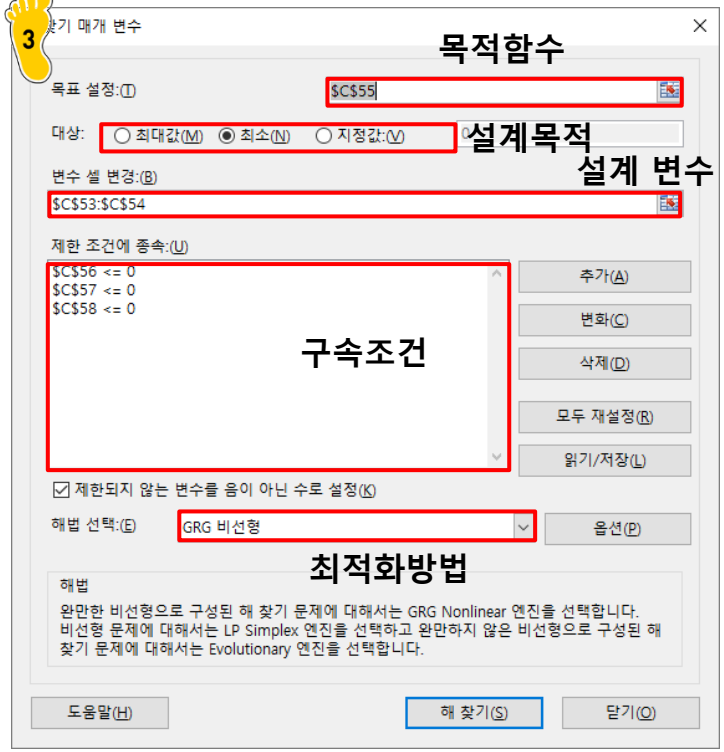
EXCEL을 이용한 최적화

	Initial	Optimum	
b	400	474.3416	
d	200	237.1708	
f	80000	112499.9928	
g1	-9.9850	-9.9910	<=0
g2	0.8125	0.0000	<=0
g3	-600	-711.5125	<=0

설계 변수

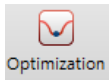
목적함수 및 구속조건
(설계 변수에 대한 함수 형태)



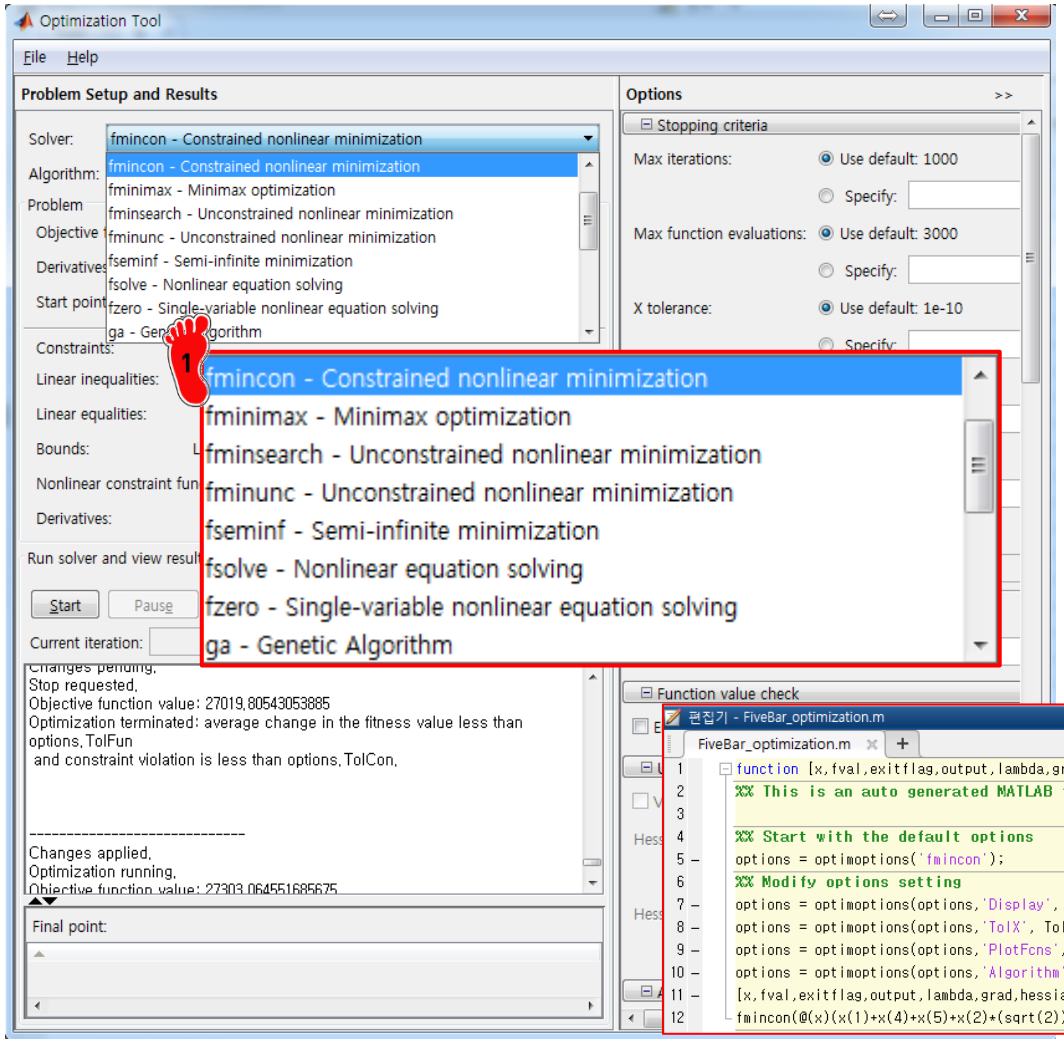


1. 변경될 변수의 값 및 목적함수/구속조건 설정
2. 해 찾기 선택 (데이터→분석)
3. 확인

MATLAB을 이용한 최적화

- MATLAB의 Optimization tool 기능을 이용 (명령어 'optimtool' 또는 아이콘 

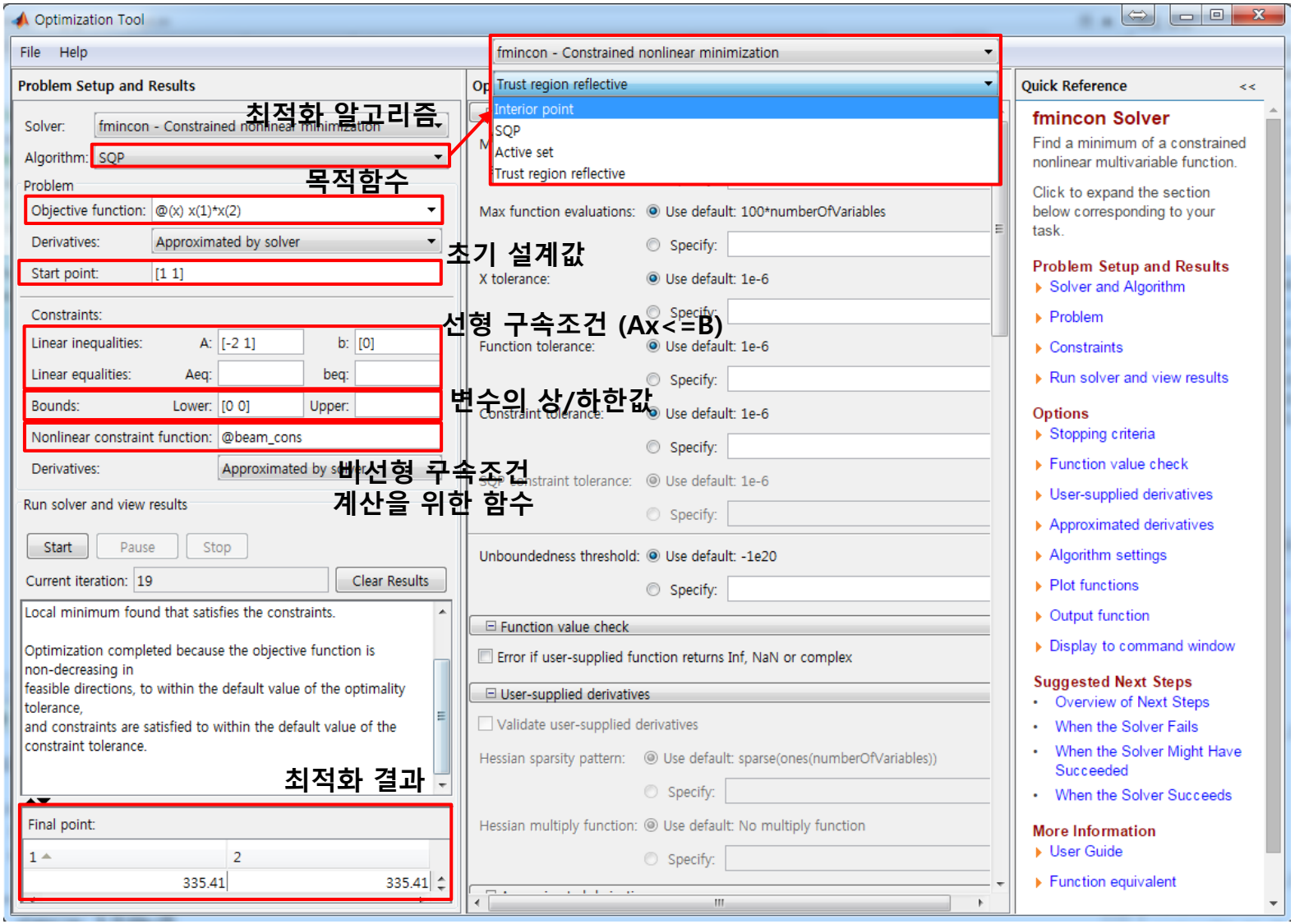
)



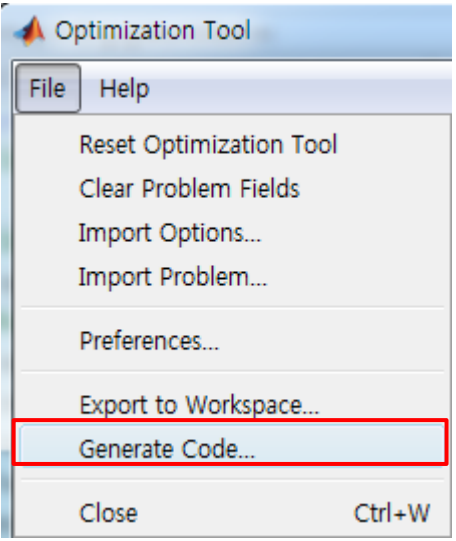
1 MATLAB의 Optimization Tool을 이용하면 다양한 솔버를 이용한 최적화 가능

본 문제와 같이 제약조건이 있는 문제의 경우에는 민감도 기반의 'fmincon'을 많이 사용하며 민감도 계산이 어렵거나 전역 최적해가 필요한 경우 'GA (genetic algorithm)' 를 사용

OPTIMTOOL 이용



GENERATE CODE 이용




```
function [x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = untitled(x0,Aineq,bineq,lb)
%% This is an auto generated MATLAB file from Optimization Tool.

%% Start with the default options
options = optimoptions('fmincon');
%% Modify options setting
options = optimoptions(options,'Display', 'off');
options = optimoptions(options,'PlotFcn', {  @optimplotx @optimplotfunccount @optimplotfval });
options = optimoptions(options,'Algorithm', 'sqp');
[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
fmincon(@(x)x(1)*x(2),x0,Aineq,bineq,[],[],lb,[],@beam_cons,options);
```

일부 상수의 경우 넘어오지 않으므로 수정 필요

```
%% Start with the default options
options = optimoptions('fmincon');
%% Modify options setting
options = optimoptions(options,'Display', 'off');
options = optimoptions(options,'PlotFcn', {  @optimplotx @optimplotfunccount @optimplotfval });
options = optimoptions(options,'Algorithm', 'sqp');
[x,fval,exitflag,output] = ...
fmincon(@(x)x(1)*x(2),[1 1],[-2 1],[0],[],[],[0 0],[],@beam_cons,options)
```

MATLAB 최적화 결과값의 의미

```
>> untitled

x =

  335.4102  335.4102


fval =

   1.1250e+05


exitflag =

     1


output =

  다음 필드를 포함한 struct:

        iterations: 19
         funcCount: 60
         algorithm: 'sqp'
           message: 'Local minimum found that satisfies the constraints.…'
    constrviolation: 2.4825e-13
          stepsize: 9.9144e-05
      lssteplength: 1
     firstorderopt: 3.1236e-06
```

```
All algorithms:
  1  First order optimality conditions satisfied.
  0  Too many function evaluations or iterations.
 -1  Stopped by output/plot function.
 -2  No feasible point found.
Trust-region-reflective, interior-point, and sqp:
  2  Change in X too small.
Trust-region-reflective:
  3  Change in objective function too small.
Active-set only:
  4  Computed search direction too small.
  5  Predicted change in objective function too small.
Interior-point and sqp:
 -3  Problem seems unbounded.
```

MATLAB 코드

최적화를 실행하는
메인 스크립트

```
%% Start with the default options
options = optimoptions('fmincon');
%% Modify options setting
options = optimoptions(options,'Display', 'final-detailed');
options = optimoptions(options,'Algorithm', 'sqp');   %
x0 = [500 500]; % Start point
[x,fval,exitflag,output] = ...
fmincon(@(x) x(1)*x(2),x0,[-2 1],[0],[],[],[0 0],[],@beam_cons,options)
```

[x, fval] = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)

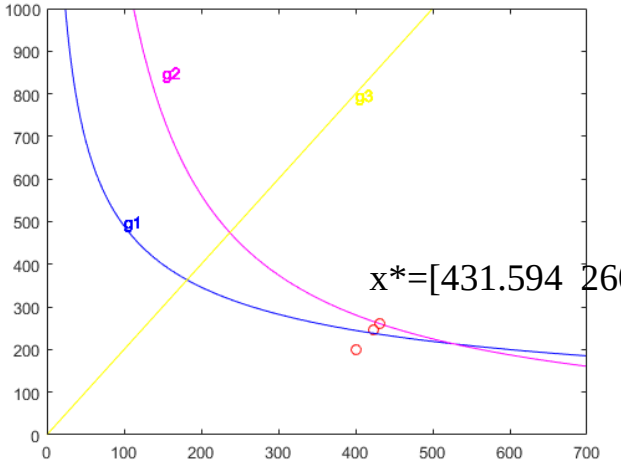
x: design variables
c: inequality constraint
ceq: equality constraint

파라미터 및 제한조건의
계산이 포함된
함수 스크립트

```
function [c ceq]=beam_cons(x)
M = 4e7; % Nmm
V = 15e4; % N
sig_a = 10; %N/mm^2
tau_a = 2; %N/mm^2

b = x(1);
d = x(2);

c(1) = 6*M/b/d^2-sig_a; %g1
c(2) = 3*V/2/b/d-tau_a; %g2
ceq=[];

%% Plot
[bb,dd]=meshgrid(0:700,0:1000);
c1 = 6*M./bb./(dd.^2)-sig_a;
c2 = 3*V/2./bb./dd-tau_a;
c3 = dd-2*bb;
contour(bb,dd,c1,[0 0],'b');text(100,500,'g1','color','b');drawnow;
hold on
contour(bb,dd,c2,[0 0],'m');text(150,850,'g2','color','m');drawnow;
hold on
contour(bb,dd,c3,[0 0],'y');text(400,800,'g3','color','y');drawnow;
hold on
plot(x(1),x(2),'o','color','r');drawnow;
```

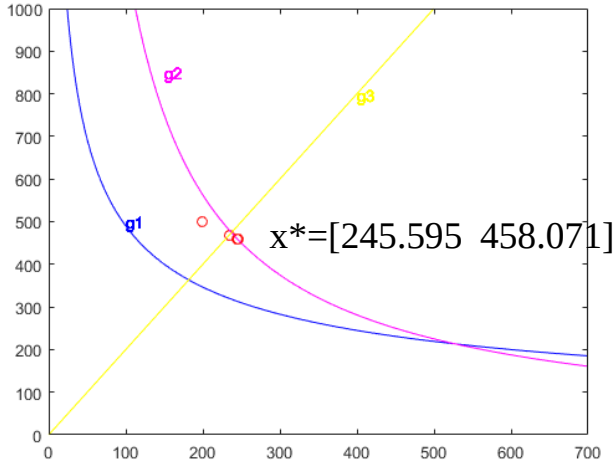
최적화 결과

x0 = [400 200], f = 112500



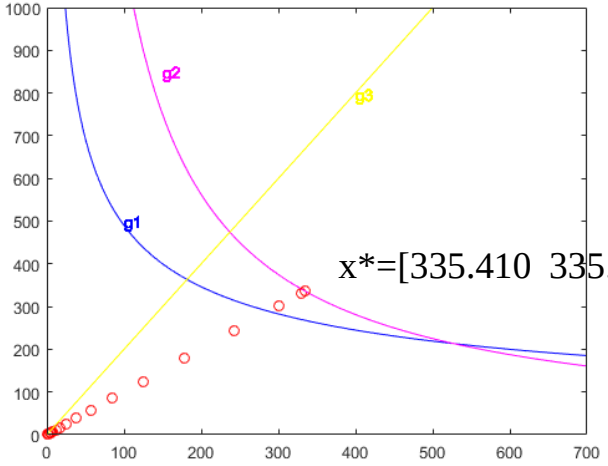
x*=[431.594 260.662]

x0 = [200 500], f = 112500



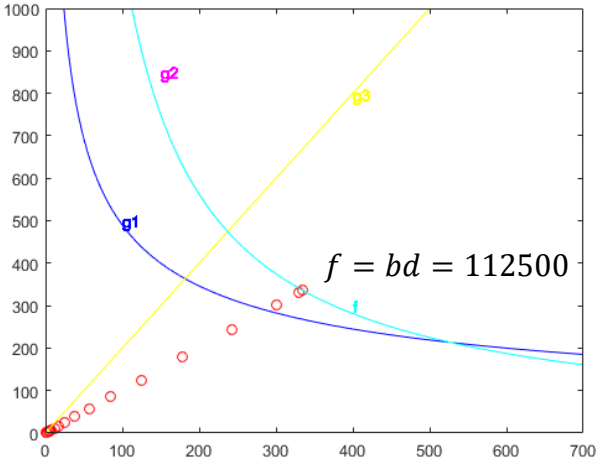
x*=[245.595 458.071]

x0 = [1 1], f = 112500



x*=[335.410 335.410]

최종 수렴 위치에 대한 목적함수 그래프

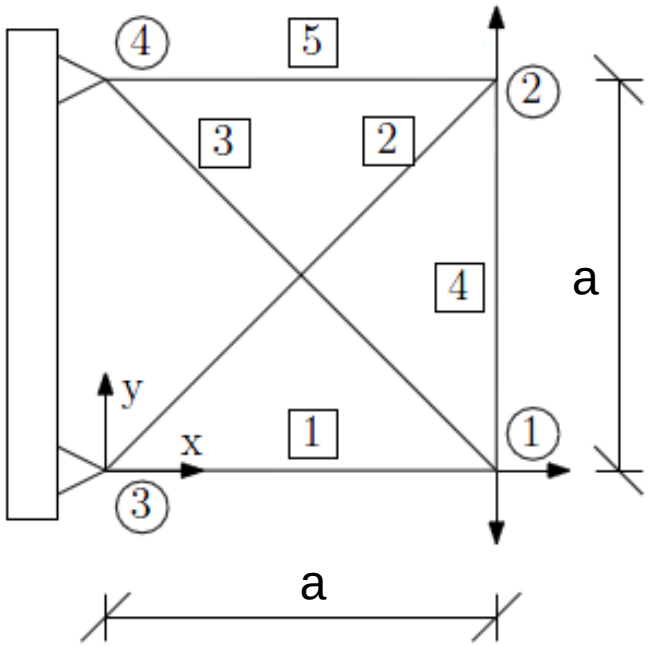


$f = bd = 112500$

목적함수 그래프가 g2 함수와 같아짐
→ 최적값을 갖는 결과가 다수 존재함

5 BAR TRUSS STRUCTURE
(VOLUME MINIMIZATION PROBLEM)
로드 요소

예제: 5 BAR STRUCTURE



Material : aluminum
탄성계수 : 6.895E4 N/mm^2
프와송비 : 0.3
질량밀도 : 2.77E-6 kg/mm^3

a = 254 mm

F_{1x} = 22.241 kN , F_{1y} = -13.344 kN
F_{2y} = 4.448 kN

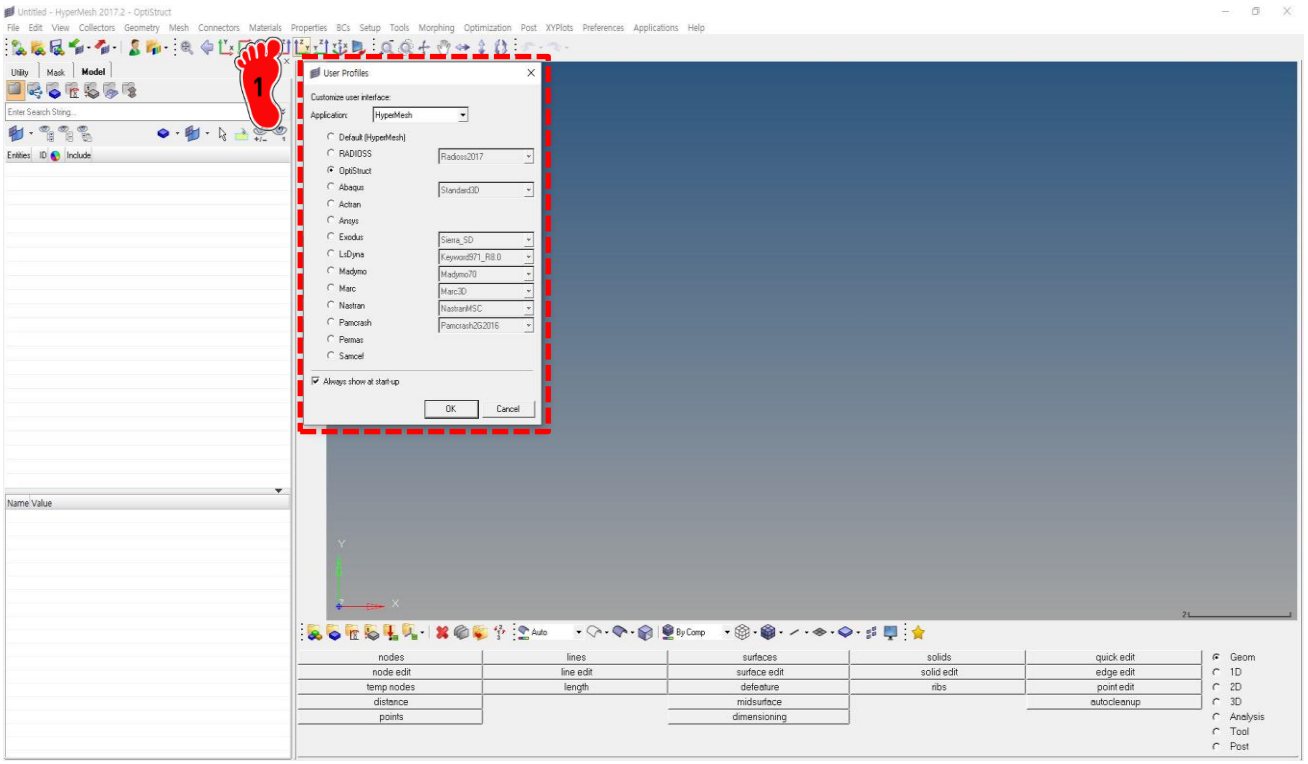
Referenced optimum values*

부재 번호	1	2	3	4	5
단면적 [mm^2]	32.26	6.45	30.39	10.77	6.45

* A. Pospisilova and M. Leps, *ACTA PLYTECHNICA*, 2012

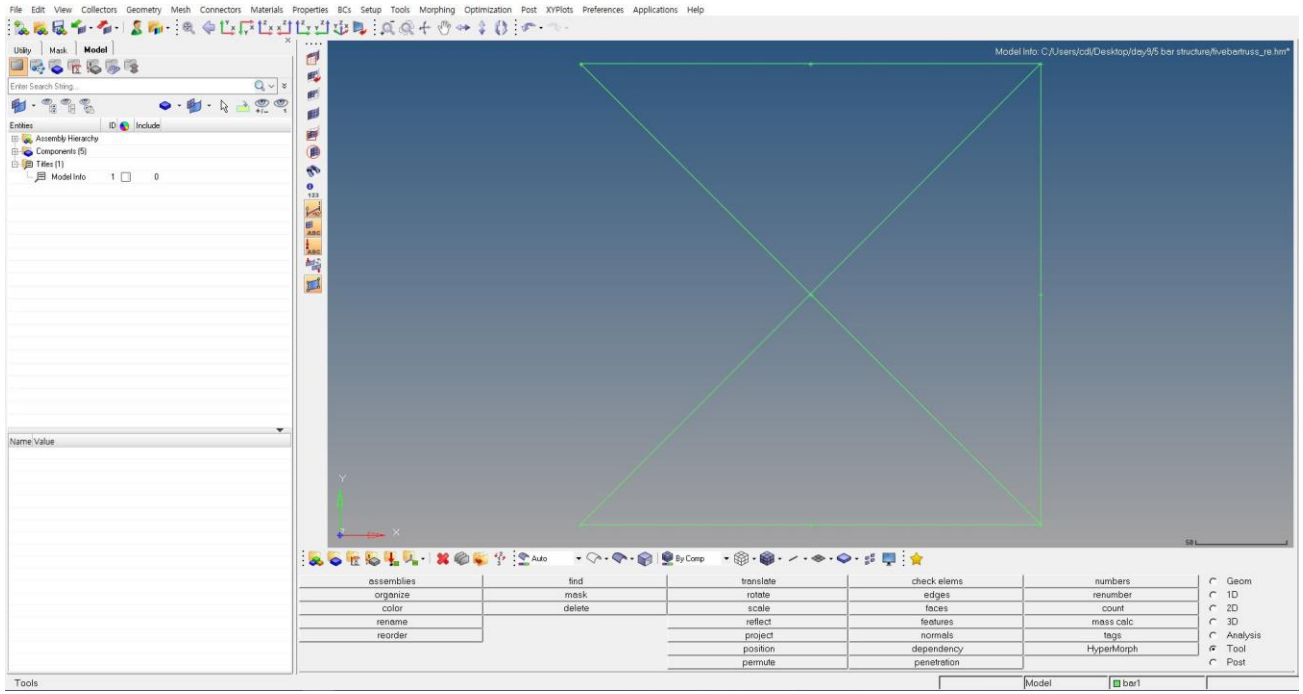
	설계 예제 (1)	설계 예제 (2)	설계 예제 (3)
설계변수	각 부재의 단면적		
설계목적	부피 최소화		
제약조건: 부재 최대응력	413.684 MPa 이하	–	413.684 MPa 이하
제약조건: 절점 최대변위	–	1.524 mm 이하(x,y dir.)	1.524 mm 이하(x,y dir.)
제약조건: 부재 단면적	6.4516 mm^2 ≤ 부재 단면적 ≤ 64.516 mm^2		

기하형상 생성 (1)



1 OptiStruct 선택, OK

기하형상 생성 (2)



1 문제에 주어진 5-bar truss 생성

좌표(x,y,z)

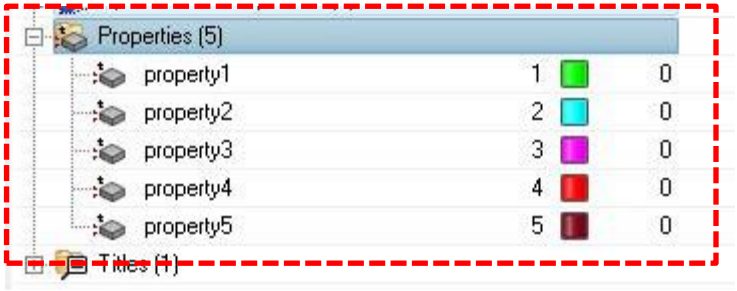
(0,0,0)
(254,0,0)
(254,254,0)
(0,254,0)

재료 물성 및 특성 입력

1 문제에 주어진 Aluminum 물성치 입력
(탄성계수 : 6.895E4 N/mm^2
프와송비 : 0.3
밀도 : 2.77E-6 kg/mm^3)

Name	Value
Solver Keyword	MAT1
Name	material1
ID	1
Color	
Include	[Master Model]
Defined	☑
Card Image	MAT1
User Comments	Hide In Menu/Export
E	68950.0
G	
NU	0.3
RHO	2.77e-006

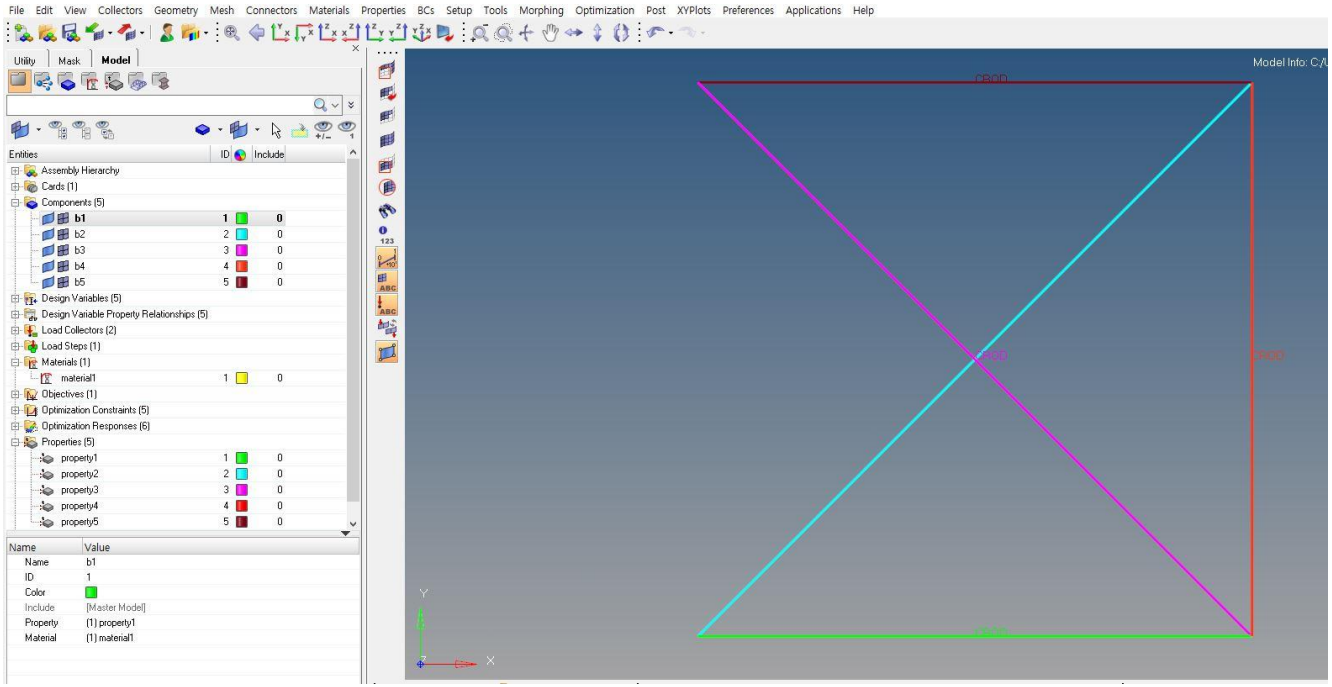
밀도 : [ton/mm^3]



5개의 PROD 특성 생성
(초기 단면적 : 20 mm^2)

Name	Value
Solver Keyword	PROD
Name	property1
ID	1
Color	
Include	[Master Model]
Defined	☑
Card Image	PROD
Material	(1) material1
User Comments	Hide In Menu/Export
beamsec	<Unspecified>
A	20.0
J	
C	
NSM	

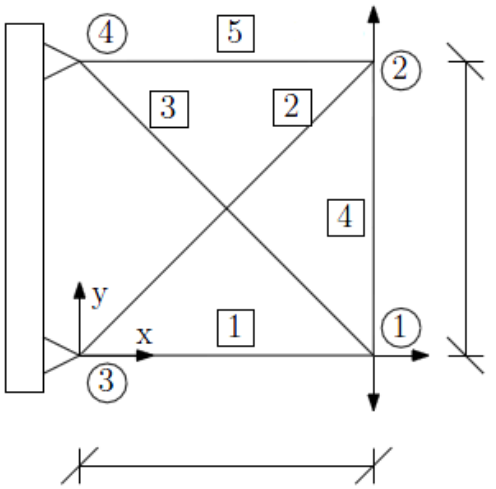
요소망 생성



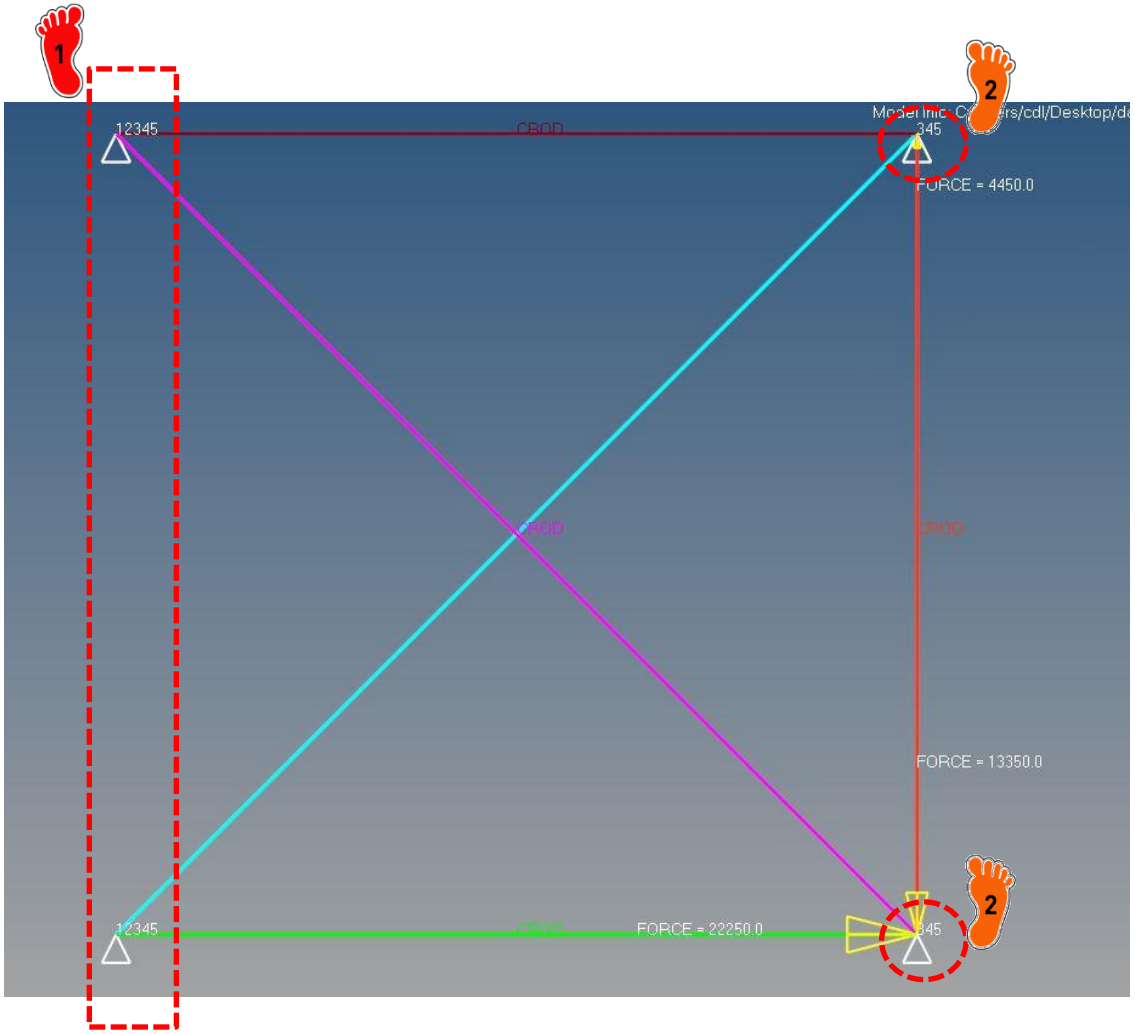
1 분할수 1인 1D CROD 요소 5개 생성

1D> Elem types> rod> CROD 선택

Node 중복을 방지하기 위해 하나의 component에서 요소를 만든 후 'Tool' -> 'organize'를 이용하여 새로운 component로 move



구속조건 및 하중조건 설정



1 핀구속

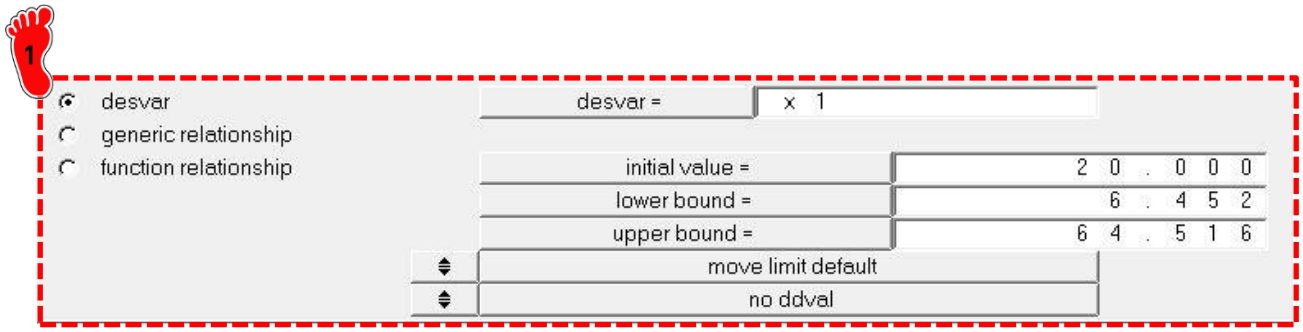
2 문제에 주어진 하중 입력

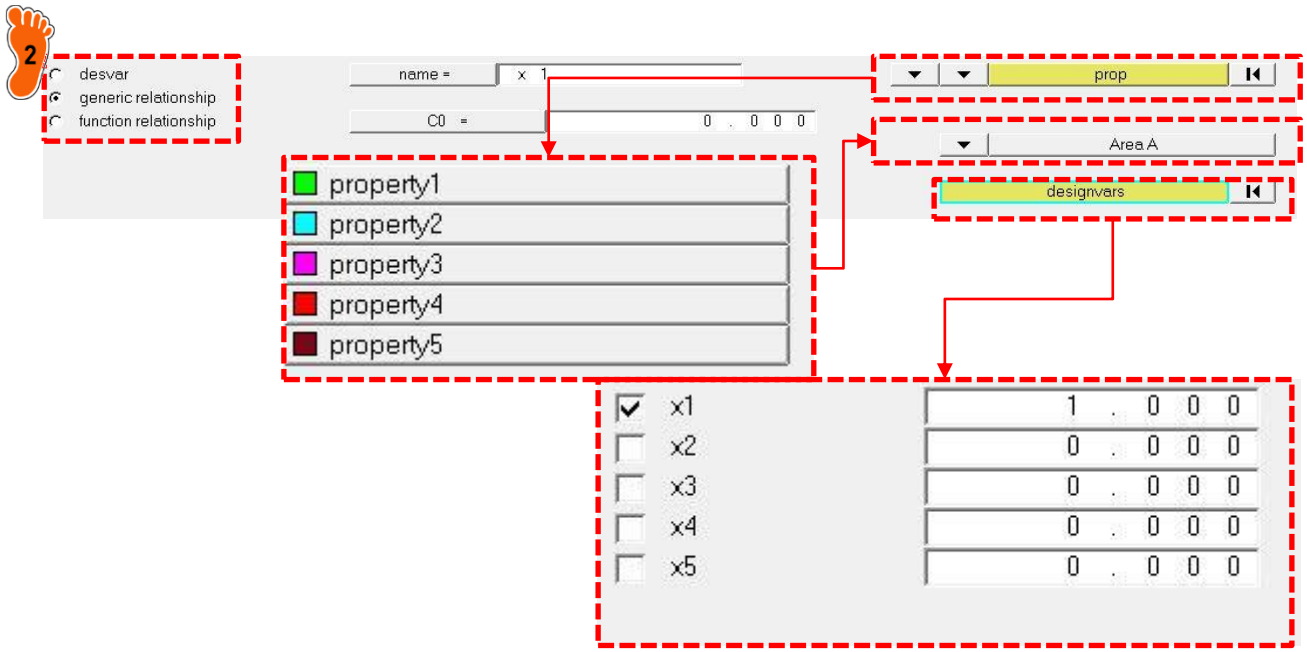
F_{1x} = 22.241 kN ,
F_{1y} = -13.344 kN
F_{2y} = 4.448 kN

3 Load step 생성

* Tool -> eadges -> tolerance -> equivalence

설계변수 설정





1 'Analysis' -> 'optimization' -> size(parameter) 클릭하여 변수 생성

설계변수 이름 및 범위 설정

설계변수는 단면적이므로
최소값 : (6.4516 mm^2)
최대값 : (64.516 mm^2)

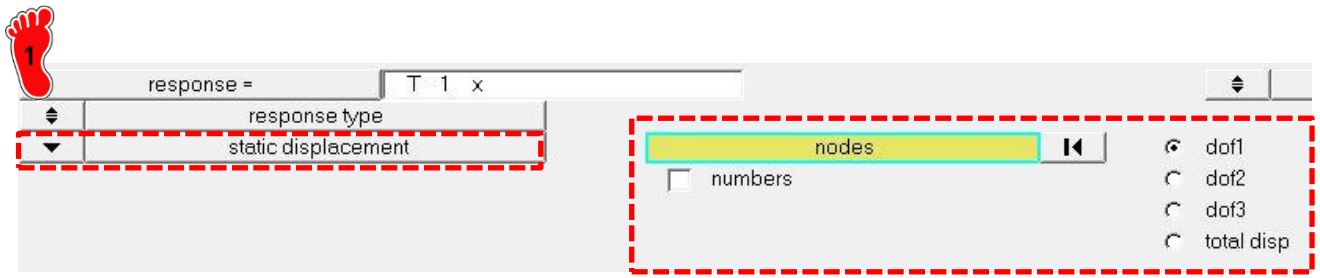
5개 부재에 해당하는 5개의 설계변수 생성

2 생성한 변수에 물리적 의미를 부여하는 과정

각각의 변수를 대응하는 부재의 특성과 연결

5개의 연결관계 생성

응답 설정



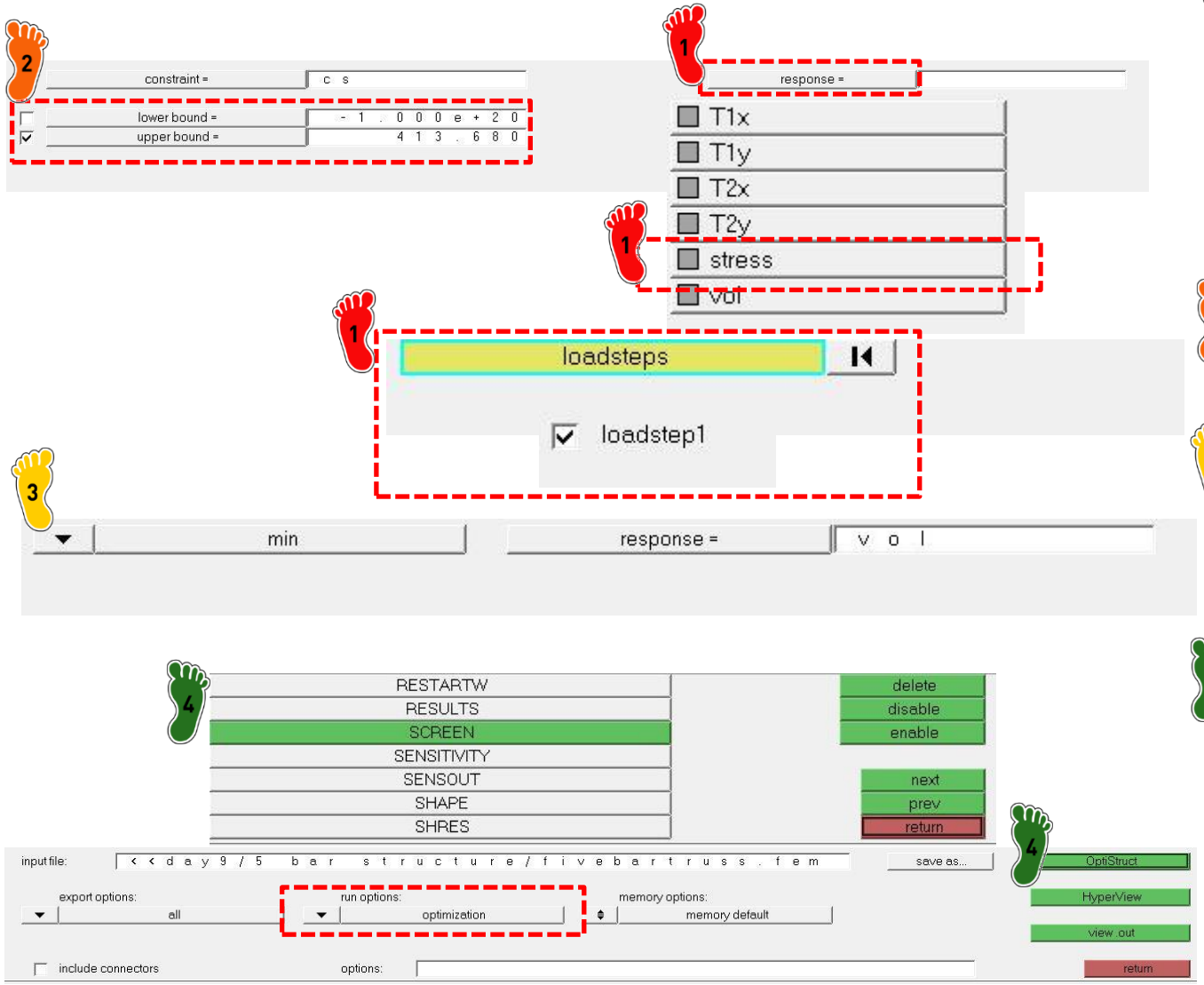
1 'Analysis' -> 'optimization' -> 'response' 클릭

조인트 1, 2에 대한 절점 변위 응답 설정 (Tx, Ty.): 4개

2 전체 요소에 대한 응력 응답 설정

3 전체 부피 응답 설정

치수 최적화 설정: (1) 응력 제약조건



1 'Analysis' -> 'optimization' -> 'dconstraints' 클릭

'response'에서 응력 응답 선택

'loadsteps' 설정

2 최대응력 제한조건 설정

3 'Analysis' -> 'optimization' -> 'objective' 클릭

부피 최소화 설정

4 'control cards' -> 'screen' 활성화

최적화 수행

최적화 결과 확인: (1) 응력 제약조건

Edit Out File C:/Users/cdl/Desktop/day9/5 bar structure/fivebartruss_stressonly_004.out

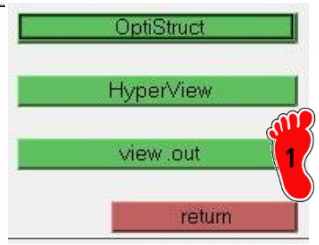
File Edit

```
ITERATION    4
  Soft convergence criterion satisfied;
 the design did not change during the last iteration.

Objective Function (Minimize VOLUM) =  2.58462E+04   % change =         0.00
Maximum Constraint Violation %      =  0.48704E-02
Volume                              = 2.58462E+004   Mass     = 7.15939E-005

 Subcase    Compliance      Epsilon
       1  2.708683E+04  0.000000E+00

Note : Epsilon = Residual Strain Energy Ratio.
```

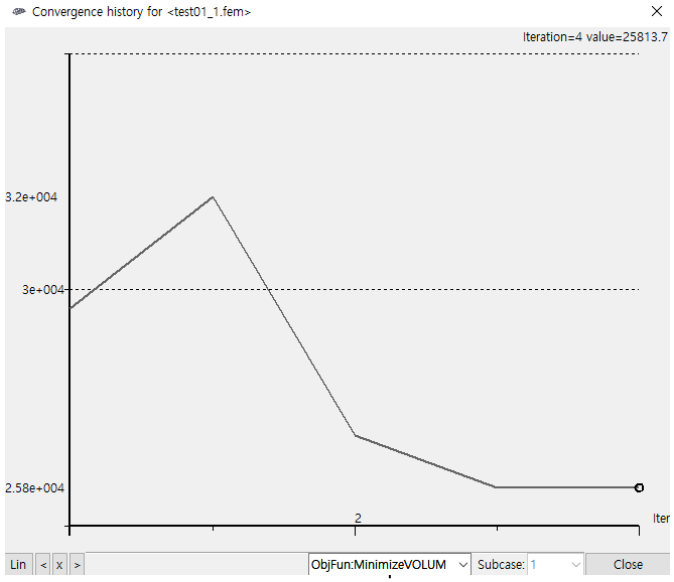
RETAINED RESPONSES TABLE

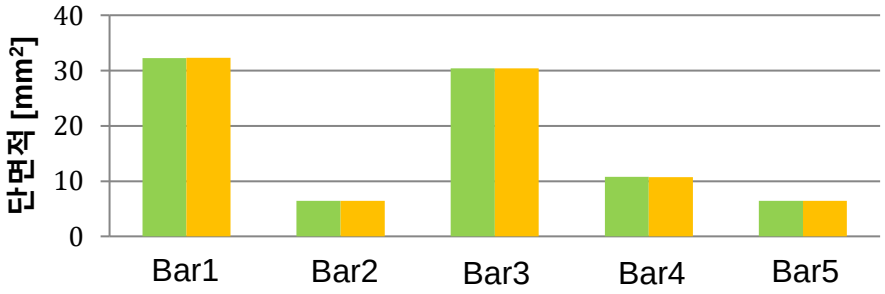
Response User-ID	Response Type	Response Label	Subcase /RANDPS /Model +Frqncy /Times	Grid/ Element/ MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg	Response Value	Objective Reference/ Constraint Bound	Viol. %
6	VOLUM	vol	--	--	TOTL	2.585E+04	MIN	
5	STRES	stress	1	4	SA	4.137E+02 <	4.137E+02	0.0 A
5	STRES	stress	1	3	SA	4.134E+02 <	4.137E+02	0.0 A
5	STRES	stress	1	1	SA	4.125E+02 <	4.137E+02	0.0 A

Design Variable ID	Design Variable Label	Lower Bound	Design Variable	Upper Bound
1	x1	6.452E+00	3.237E+01	6.452E+01
2	x2	6.452E+00	6.452E+00	6.452E+01
3	x3	6.452E+00	3.044E+01	6.452E+01
4	x4	6.452E+00	1.076E+01	6.452E+01
5	x5	6.452E+00	6.452E+00	6.452E+01



1. 'view.out'클릭하여 해석결과 확인
2. 최적설계 결과 목적함수 값 확인
3. 최적설계 결과 설계변수 값 확인



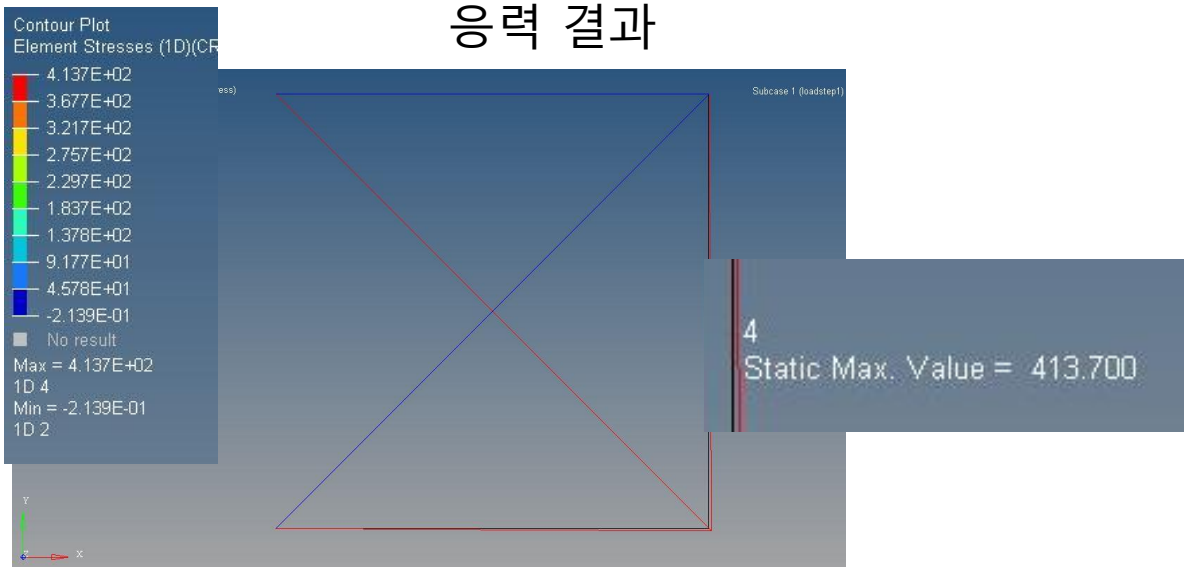


: Reference (vol = 2.6e4 mm^3)

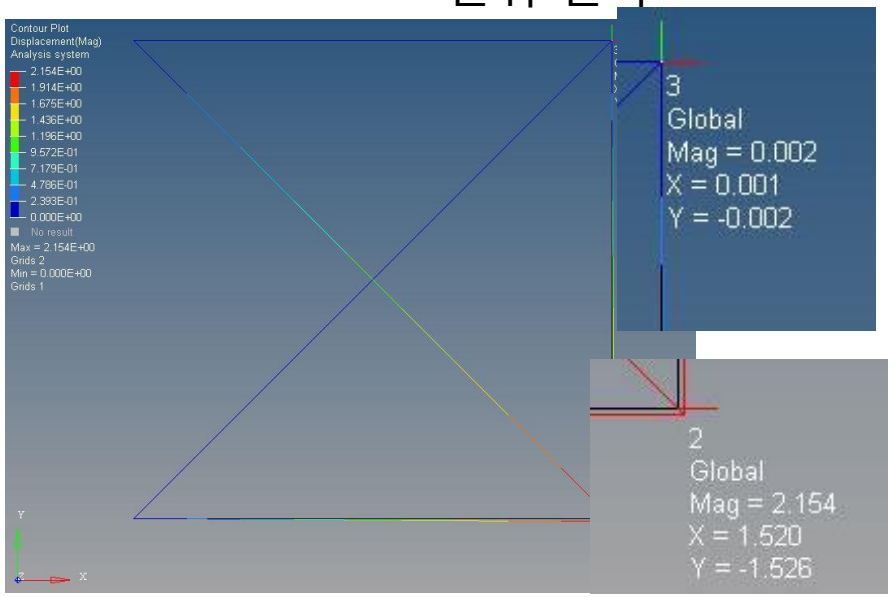
: HM (vol = 2.6e4 mm^3)

후처리: (1) 응력 제약조건

응력 결과



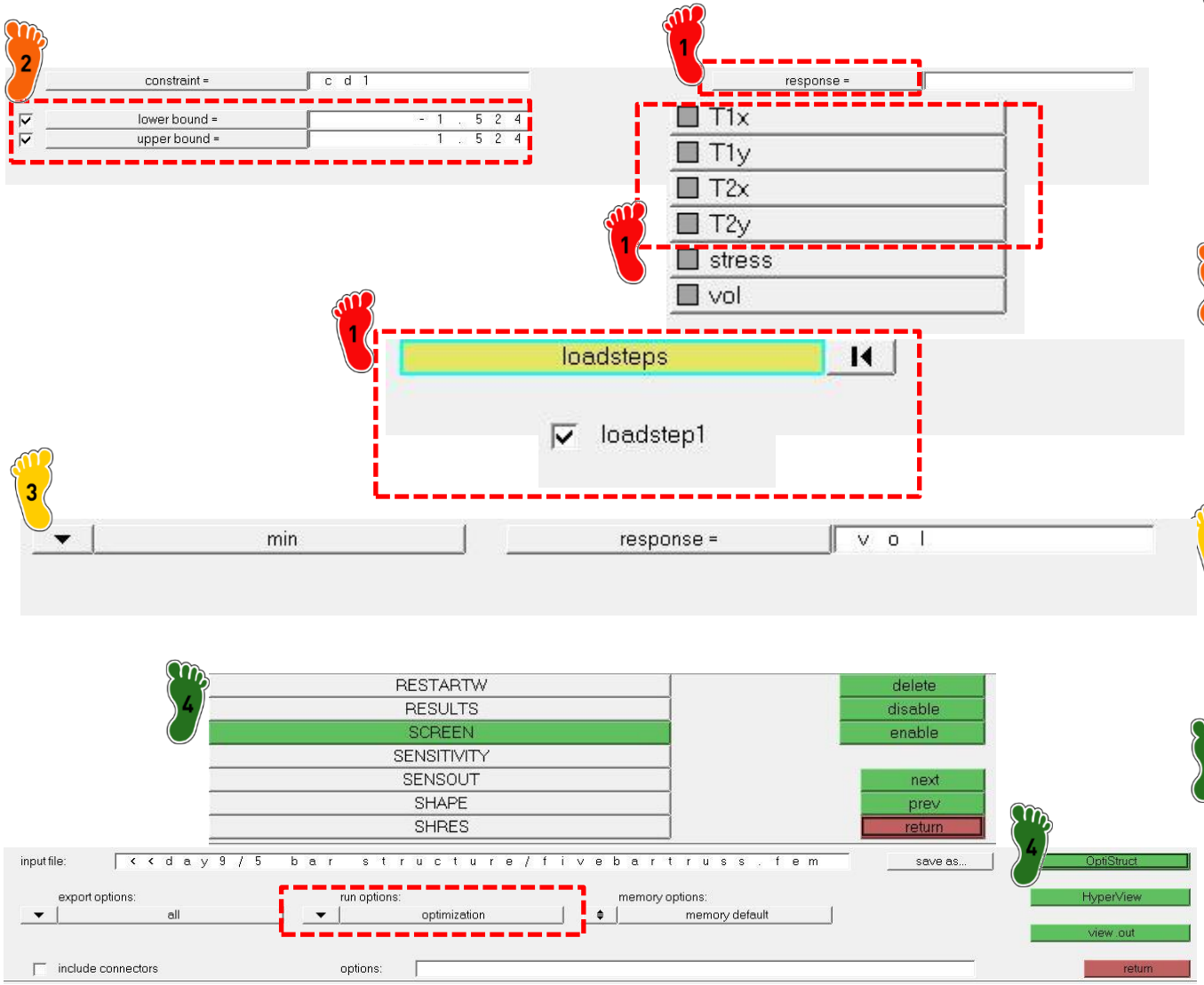
변위 결과



변위 제약조건을 부여하지 않음.
절점 2의 y축 방향 변위가 위배됨 (|Ty|>1.524mm)

* Measures → Add (Measure Group 3) → Relative Displacement 선택 → X, Y 체크 → Nodes 클릭

치수 최적화 설정: (2) 변위 제약조건



1 'Analysis' -> 'optimization' -> 'dconstraints' 클릭

'response'에서 변위 응답 선택

'loadsteps' 설정

2 최대변위 제한조건 설정

총 4개의 변위 제약조건

3 'Analysis' -> 'optimization' -> 'objective' 클릭

부피 최소화 설정

4 'control cards' -> 'screen' 활성화

최적화 수행

최적화 결과 확인: (2) 변위 제약조건

Edit Out File C:/Users/cdl/Desktop/day9/5 bar structure/fivebartruss_disponly.out

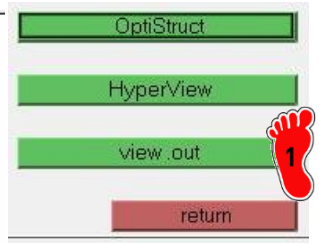
File Edit

```
ITERATION    5
  Soft convergence criterion satisfied;
 the design did not change during the last iteration.

Objective Function (Minimize VOLUM) =  2.50395E+04   % change =         0.00
Maximum Constraint Violation %      =  0.00000E+00
Volume                              = 2.50395E+004   Mass      = 6.93595E-005

 Subcase    Compliance      Epsilon
       1  2.880640E+04  0.000000E+00

Note : Epsilon = Residual Strain Energy Ratio.
```

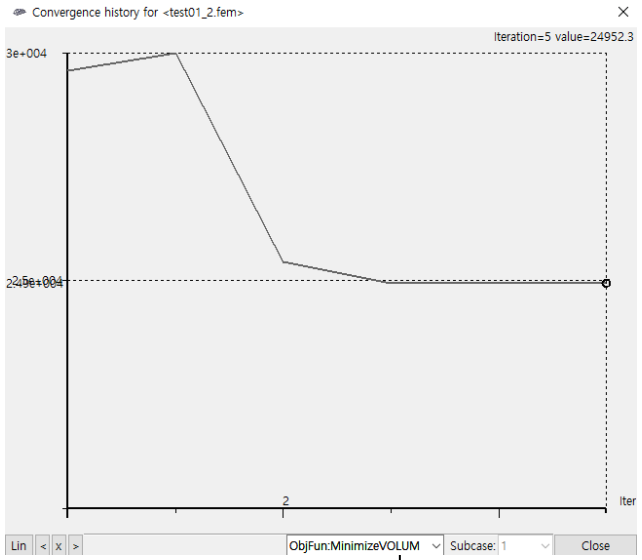
RETAINED RESPONSES TABLE

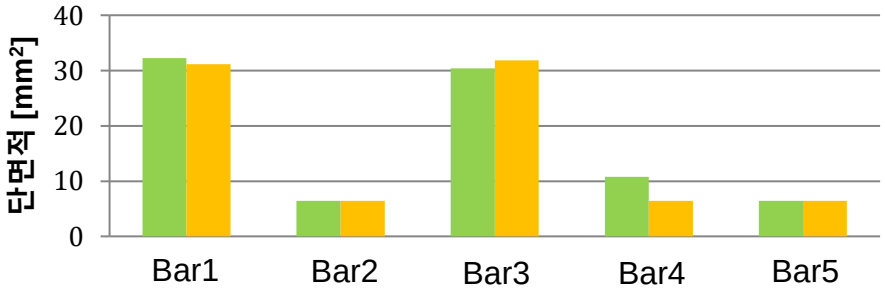
Response User-ID	Type	Response Label	Subcase /RANDPS /Model +Frqncy /Times	Grid/ Element/ MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg	Response Value		Objective Reference/ Constraint Bound	Viol. %
6	VOLUM	vol	--	--	TOTL	2.504E+04	MIN		
1	DISPL	T1x	1	2	TX	1.517E+00	<	1.524E+00	0.0 A
2	DISPL	T1y	1	2	TY	-1.517E+00	>	-1.524E+00	0.0 A
4	DISPL	T2y	1	3	TY	8.118E-01	<	1.524E+00	0.0

Design Variable ID	Design Variable Label	Lower Bound	Design Variable	Upper Bound
1	x1	6.452E+00	3.152E+01	6.452E+01
2	x2	6.452E+00	6.452E+00	6.452E+01
3	x3	6.452E+00	3.184E+01	6.452E+01
4	x4	6.452E+00	6.452E+00	6.452E+01
5	x5	6.452E+00	6.452E+00	6.452E+01



1. 'view.out'클릭하여 해석결과 확인
2. 최적설계 결과 목적함수 값 확인
3. 최적설계 결과 설계변수 값 확인



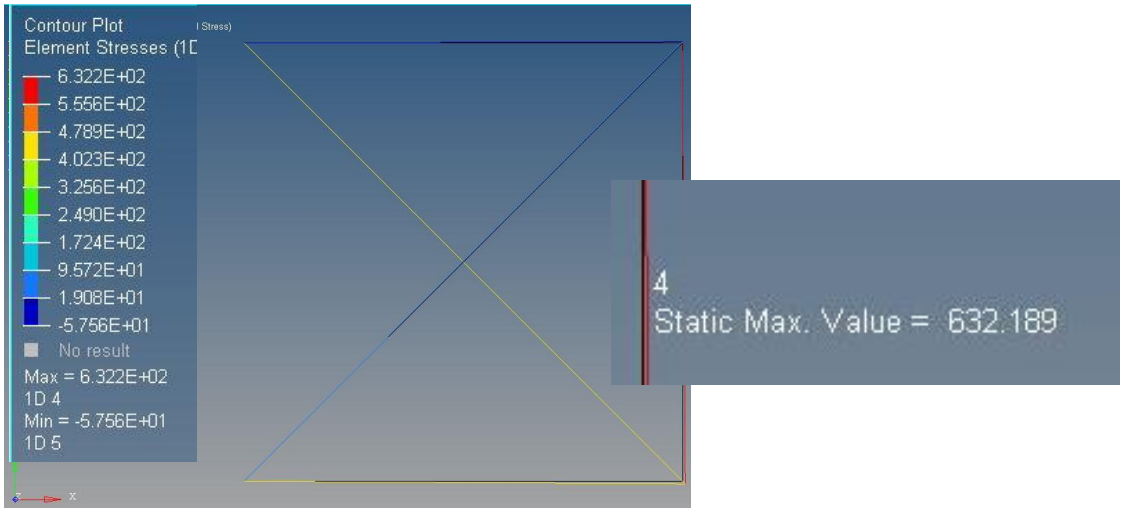


: Reference (vol = 2.6e4 mm^3)

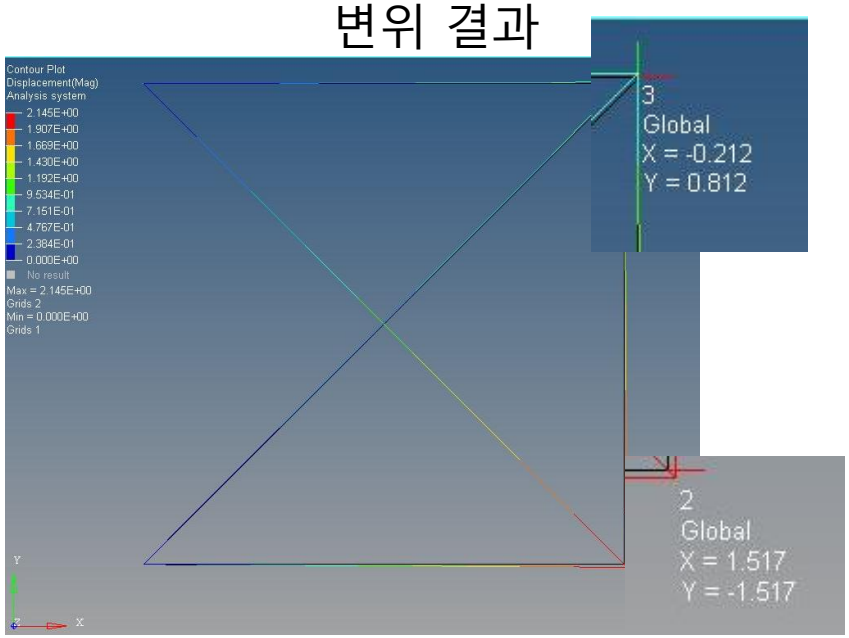
: HM (vol = 2.5e4 mm^3)

후처리: (2) 변위 제약조건

응력 결과



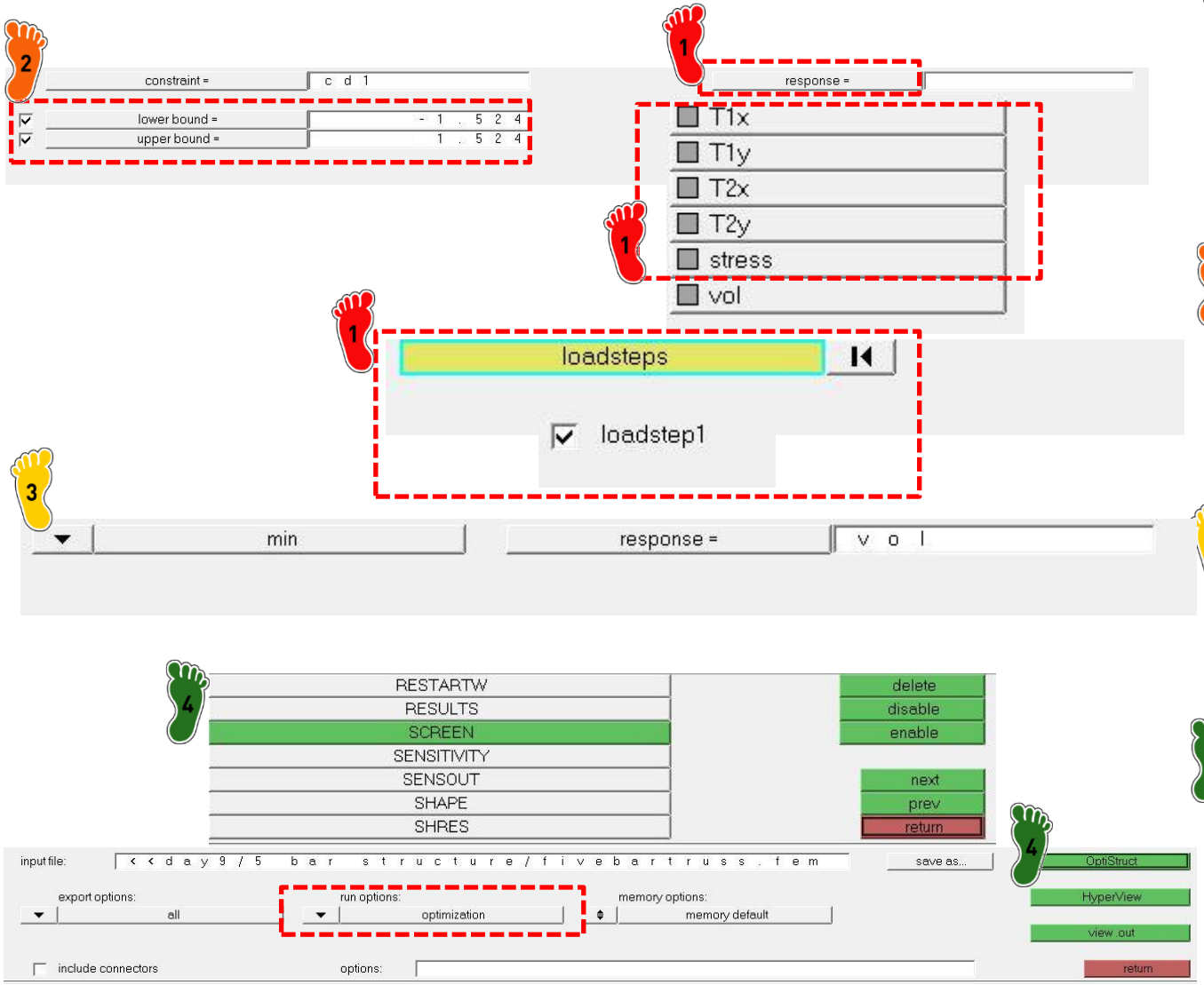
변위 결과



변위조건은 모두 만족하나 응력조건을 위반한 결과가 나타남 (>413.684 MPa)

* Measures → Add (Measure Group 3) → Relative Displacement 선택 → X, Y 체크 → Nodes 클릭

치수 최적화 설정: (3) 응력 & 변위



1 'Analysis' -> 'optimization' -> 'dconstraints' 클릭

'response'에서 응력 및 변위 응답 선택

'loadsteps' 설정

2 최대변위 제한조건 설정

총 5개의 변위 제약조건

3 'Analysis' -> 'optimization' -> 'objective' 클릭

부피 최소화 설정

4 'control cards' -> 'screen' 활성화

최적화 수행

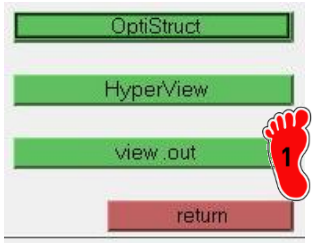
최적화 결과 확인: (3) 응력 & 변위

Edit Out File C:/Users/cdl/Desktop/day9/5 bar structure/fivebartruss_003.out

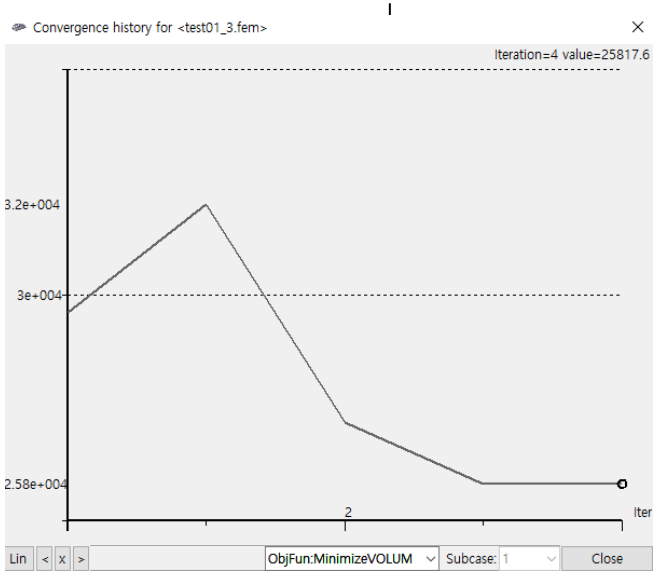
File Edit

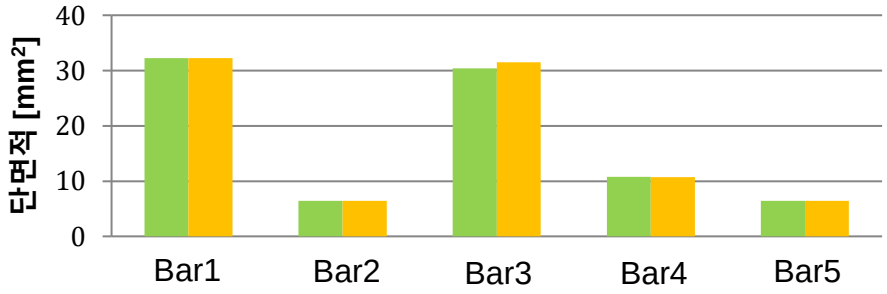
```
ITERATION    4
  Soft convergence criterion satisfied;
 the design did not change during the last iteration.


Objective Function (Minimize VOLUM) =  2.58437E+04   % change =        0.00
Maximum Constraint Violation %      =  0.00000E+00
Volume                              = 2.58437E+004   Mass      = 7.15870E-005

 Subcase   Compliance     Epsilon
       1  2.70899E+04  0.000000E+00

Note : Epsilon = Residual Strain Energy Ratio.


                        RETAINED RESPONSES TABLE
-------------------------------------------------------------------------------
Response Type  Response    Subcase Grid/     DOF/   Response     Objective    Viol.
User-ID          Label     /RANDPS Element/  Comp     Value      Reference/    %
                           /Model  MID/PID/  /Reg                Constraint
                           +Frqncy Mode No.                      Bound
                           /Times
-------------------------------------------------------------------------------
      6 VOLUM vol              --        --  TOTL   2.584E+04 MIN
      1 DISPL T1x               1         2    TX   1.523E+00  <  1.524E+00    0.0 A
      2 DISPL T1y               1         2    TY  -1.519E+00  > -1.524E+00    0.0 A
      5 STRES stress            1         4    SA   4.137E+02  <  4.137E+02    0.0 A
      5 STRES stress            1         3    SA   4.128E+02  <  4.137E+02    0.0 A
      5 STRES stress            1         1    SA   4.134E+02  <  4.137E+02    0.0 A
-------------------------------------------------------------------------------
```

```
-------------------------------------------------------------
 Design    Design    Lower       Design      Upper
Variable  Variable  Bound      Variable     Bound
   ID       Label
-------------------------------------------------------------
      1  x1        6.452E+00   3.229E+01   6.452E+01
      2  x2        6.452E+00   6.452E+00   6.452E+01
      3  x3        6.452E+00   3.050E+01   6.452E+01
      4  x4        6.452E+00   1.075E+01   6.452E+01
      5  x5        6.452E+00   6.452E+00   6.452E+01
-------------------------------------------------------------
```



1. 'view.out'클릭하여 해석결과 확인
2. 최적설계 결과 목적함수 값 확인
3. 최적설계 결과 설계변수 값 확인



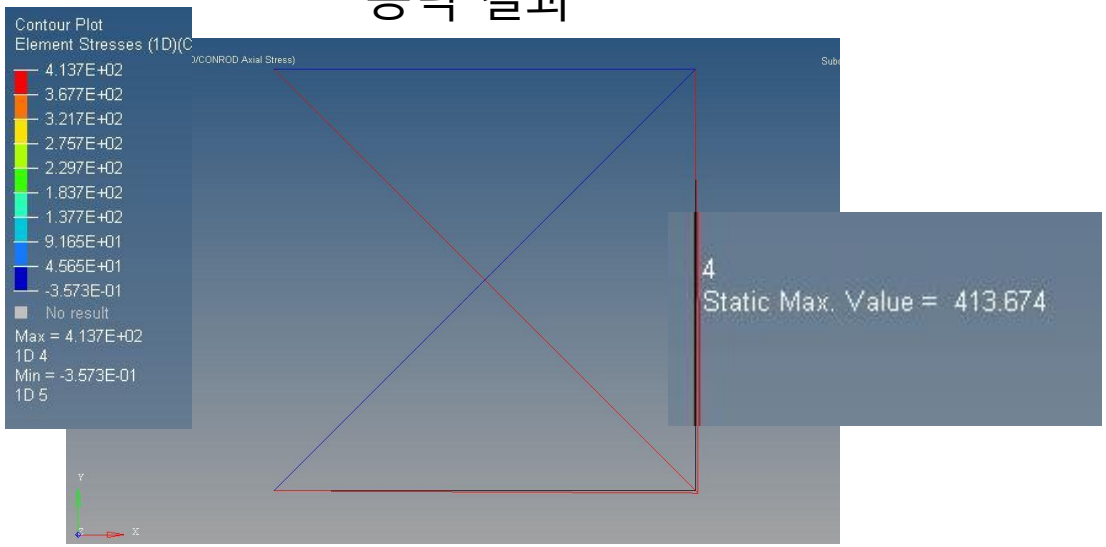


: Reference (vol = 2.6e4 mm^3)

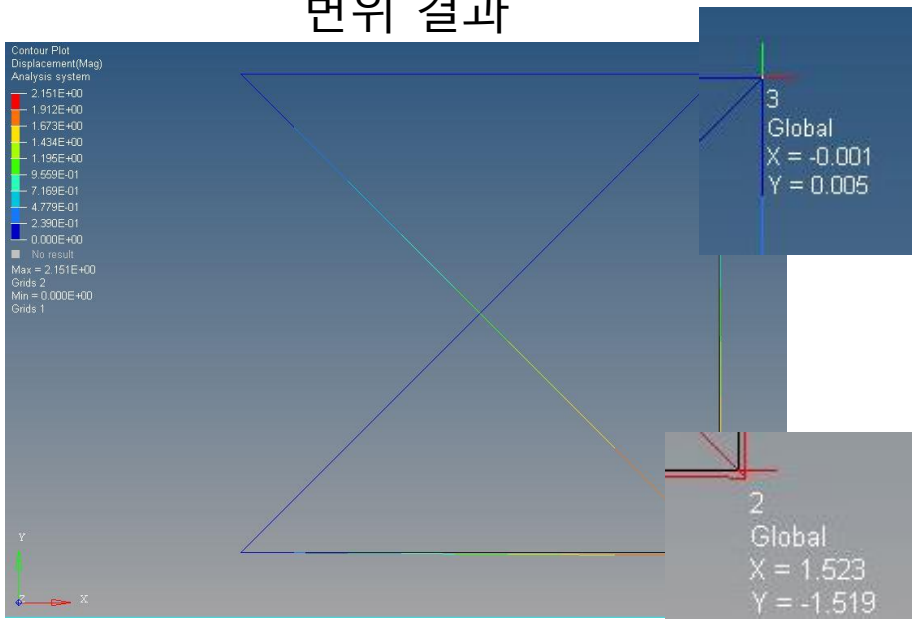
: HM (vol = 2.6e4 mm^3)

후처리: (3) 응력 & 변위

응력 결과



변위 결과



응력 및 범위조건 모두 만족함

* Measures → Add (Measure Group 3) → Relative Displacement 선택 → X, Y 체크 → Nodes 클릭

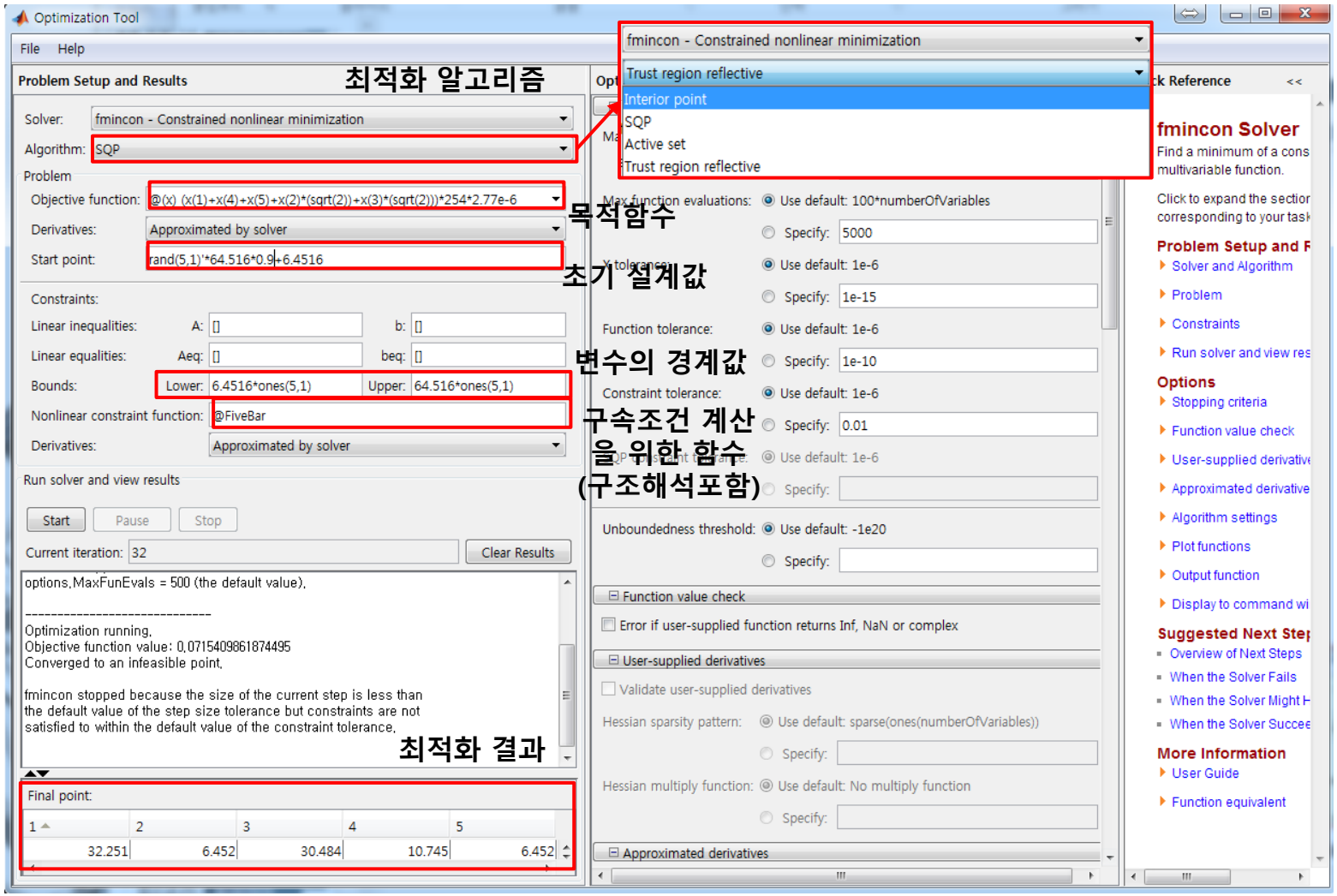
치수 최적화 결과

		최적화 문제			
		참고 문헌	(1) 응력 제약	(2) 변위 제약	(3) 응력 & 변위
부피[mm^3]		2.6e4	2.6e4	2.5e4	2.6e4
최대 응력[MPa]		414.09	413.70	632.19	413.67
변위 [mm]	절점 1,x	1.52	1.52	1.52	1.52
	절점 1,y	-1.52	-1.53	-1.52	-1.52
	절점 2,x	0.001	0.001	-0.21	-0.001
	절점 2,y	-0.004	-0.002	0.81	0.005
변수 [mm^2]	A1	32.26	32.37	31.52	32.29
	A2	6.45	6.45	6.45	6.45
	A3	30.39	30.44	31.84	30.50
	A4	10.77	10.76	6.45	10.75
	A5	6.45	6.45	6.45	6.45

HyperMesh를 이용한 치수 최적화의 경우 참고 문헌의 결과와 유사한 결과가 도출된 것을 알 수 있음

MATLAB을 이용한 최적화: fmincon

- 최적화 세팅



MATLAB을 이용한 최적화: fmincon

		최적화 문제			
		참고 문헌	(1) 응력 제약	(2) 변위 제약	(3) 응력 & 변위
부피[mm^3]		2.6e4	2.6e4	2.5e4	2.6e4
최대 응력[MPa]		414.09	413.68	632.33	414.70
변위 [mm]	절점 1,x	1.52	1.52	1.52	1.52
	절점 1,y	-1.52	-1.52	-1.52	-1.52
	절점 2,x	0.001	3.92e-7	-0.21	-8.30e-6
	절점 2,y	-0.004	-1.50e-6	0.81	3.19e-5
변수 [mm^2]	A1	32.26	32.26	31.37	32.26
	A2	6.45	6.45	6.45	6.45
	A3	30.39	30.41	31.67	30.41
	A4	10.77	10.75	6.45	10.75
	A5	6.45	6.45	6.45	6.45

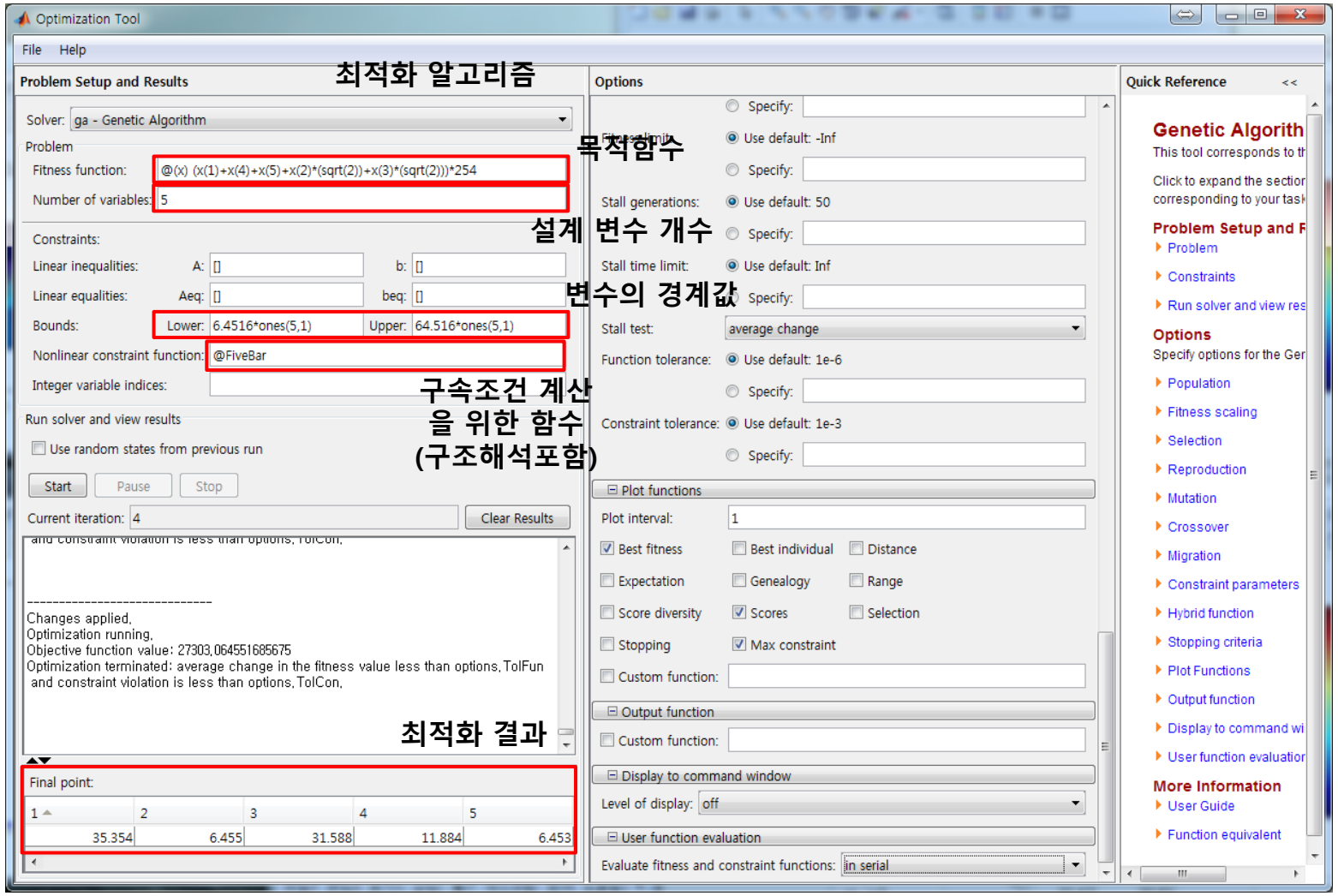
MATLAB의 fmincon 솔버의 경우 민감도를 이용한 알고리즘을 사용하며 크게 4가지 방법을 사용

본 문제에 적용 가능한 방법은 'Interior point', 'SQP', 'Active set' 3가지이며, 본 문제의 경우 결과에 큰 차이가 없으므로 기본으로 되어 있는 'Interior point'를 이용한 결과 이용함

참고 문헌의 결과와 유사한 결과를 나타냄

MATLAB을 이용한 최적화: GA

- 최적화 세팅



MATLAB을 이용한 최적화: GA

		최적화 문제			
		참고 문헌	(1) 응력 제약	(2) 변위 제약	(3) 응력 & 변위
부피[mm^3]		2.6e4	2.6e4	2.7e4	2.6e4
최대 응력[MPa]		414.09	414.02	593.93	414.10
변위 [mm]	절점 1,x	1.52	1.52	1.39	1.52
	절점 1,y	-1.52	-1.52	-1.39	-1.52
	절점 2,x	0.001	9.0e-7	-0.21	1.71e-5
	절점 2,y	-0.004	-3.4e-6	0.8	-6.53e-5
변수 [mm^2]	A1	32.26	32.23	34.45	32.23
	A2	6.45	6.45	6.45	6.45
	A3	30.39	30.39	34.78	30.38
	A4	10.77	10.74	6.87	10.74
	A5	6.45	6.45	6.45	6.45

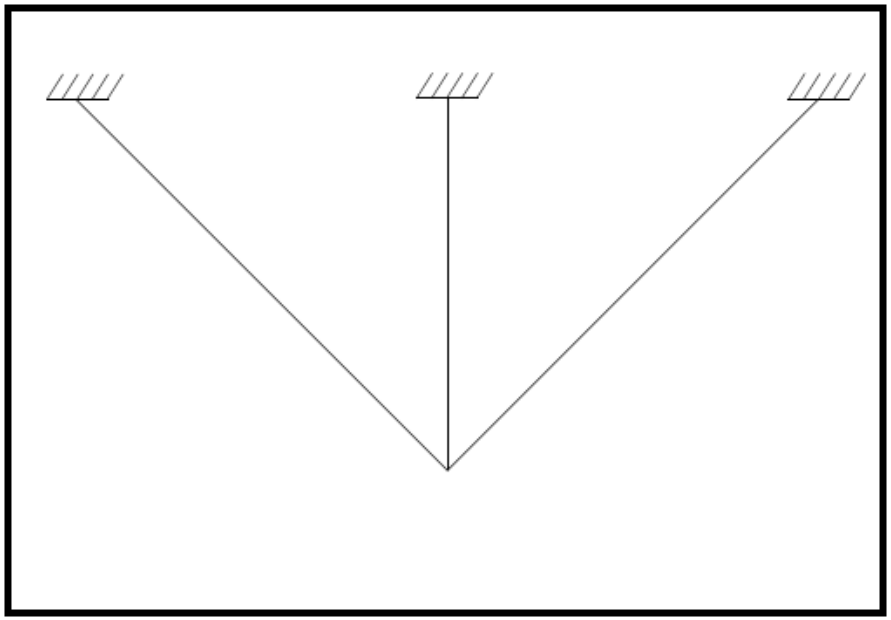
GA의 경우 최적화 계산과정에서 랜덤 요인이 포함되기 때문에 100번을 수행하여 제일 좋은 결과를 도출함

참고 문헌의 결과와 유사한 결과를 나타냄

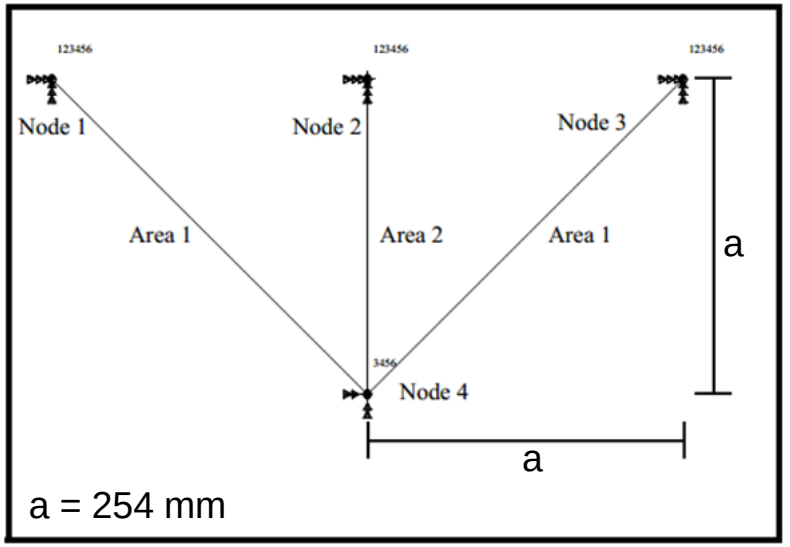
응력 제약 문제의 경우 변위 제약조건을 고려하지 않음에도 변위 제약조건을 만족하는 것을 알 수 있음

숙제: EIGENVALUE 최적화

- Weight (volume) minimization of a three bar truss



Modeling



Objectives :

Minimize the weight of the truss

1st eigen frequency must be between
1,500 Hz – 1,550 Hz
(모드해석 케이스 필요)
(센서→시스템 →모드)

Material : aluminum

Initial value of each area

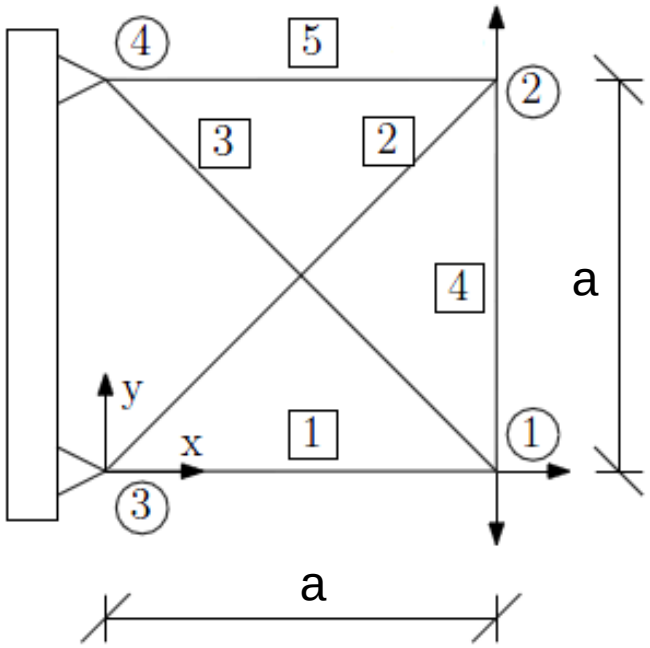
Area 1 : 645.16 mm^2
Area 2 : 1290.32 mm^2

Upper and lower bound of section area

64.516 ≤ Area 1 or 2 ≤ 6451.6

3 BAR TRUSS STRUCTURE
(TOPOLOGY + SIZE OPTIMIZATION)

예제: 5 BAR STRUCTURE



Material : aluminum
탄성계수 : 6.895E4 N/mm^2
프와송비 : 0.3
질량밀도 : 2.77E-6 kg/mm^3

a = 254 mm

F_{1x} = 22.241 kN , F_{1y} = -13.344 kN
F_{2y} = 4.448 kN

문제정식화

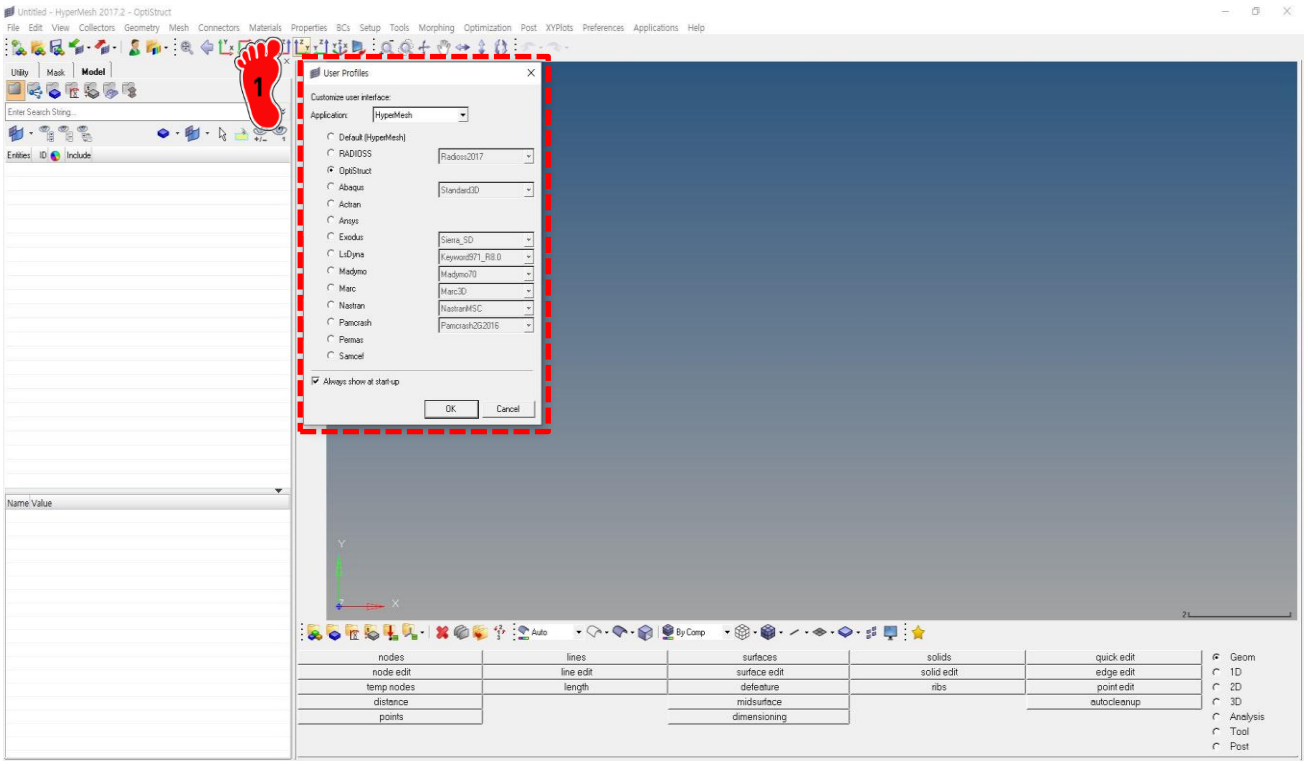
설계변수 : 각 부재의 단면적
설계목적 : 부피 최소화
설계제약조건
부재 최대응력 413.684 MPa 이하
절점 최대변위(x,y방향) 1.524 mm 이하
6.4516 mm^2 ≤ 부재 단면적 ≤ 64.516 mm^2

Referenced optimum values*

부재 번호	1	2	3	4	5
단면적 [mm^2]	32.26	6.45	30.39	10.77	6.45

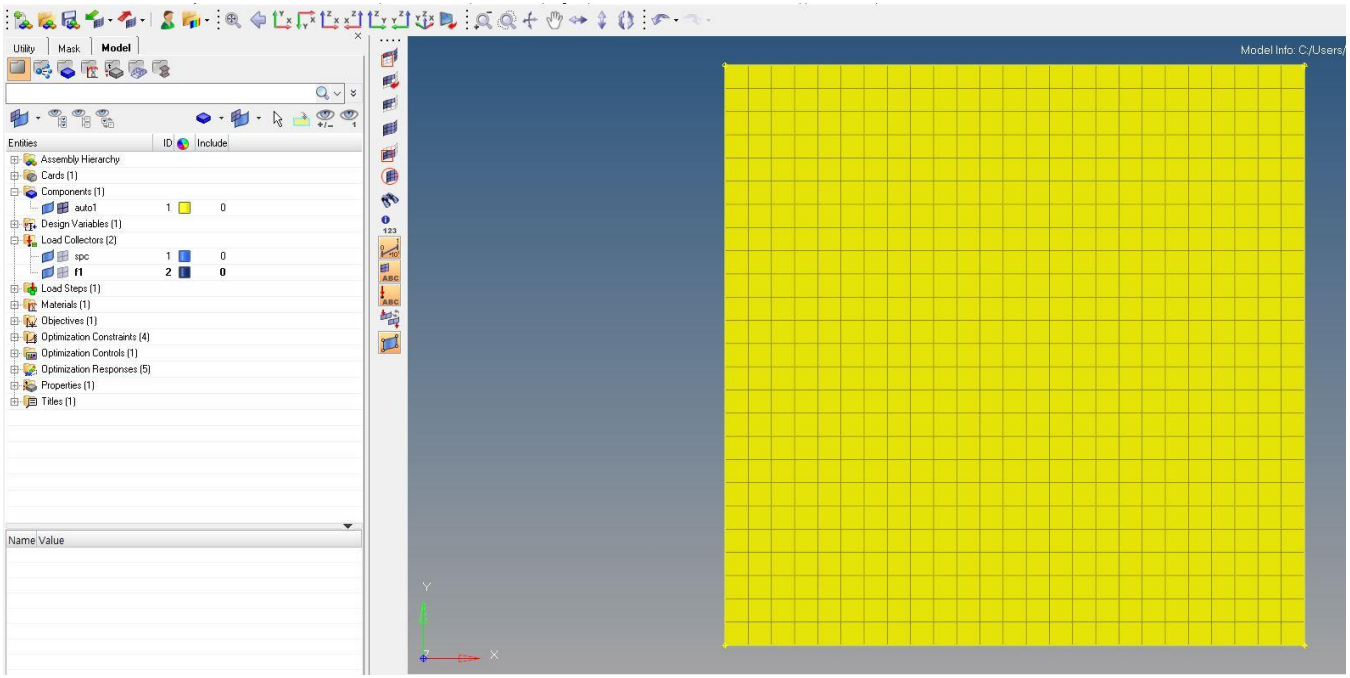
* A. Pospisilova and M. Leps, *ACTA PLYTECHNICA*, 2012

기하형상 생성 (1)



1 OptiStruct 선택, OK

기하형상 생성 (2)

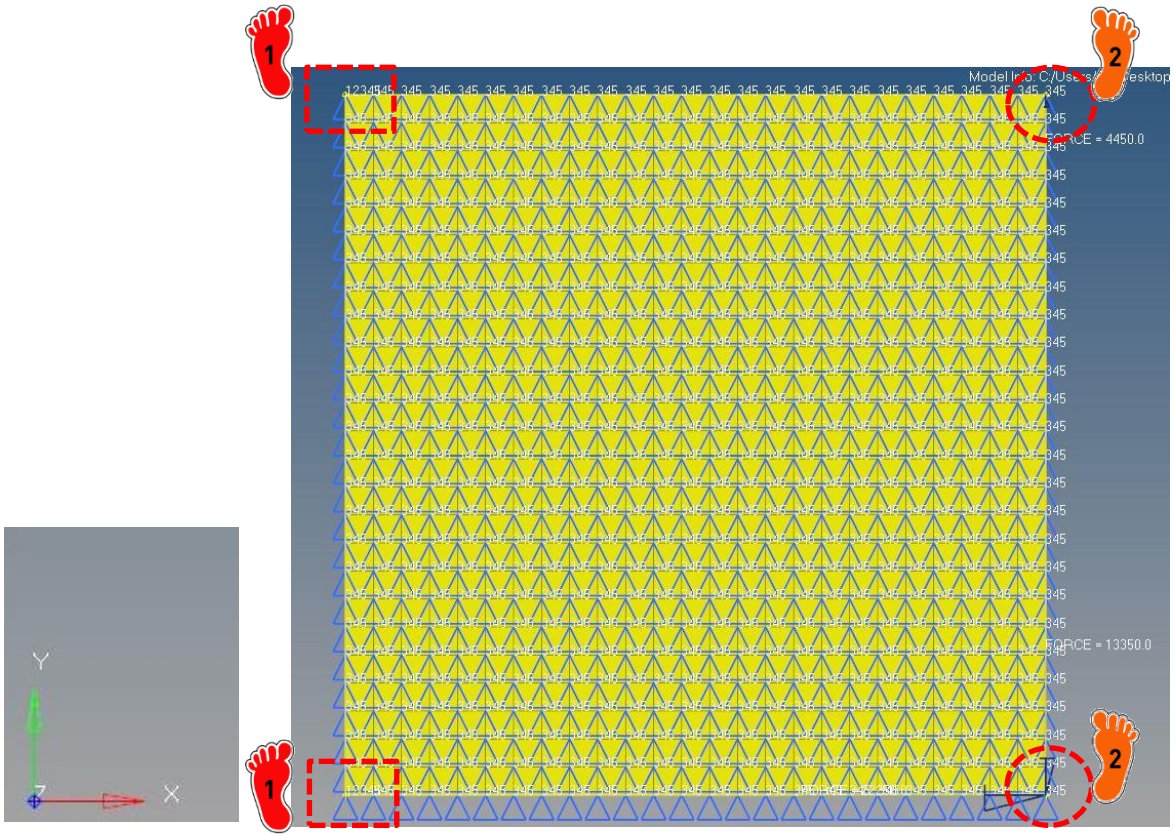


1 254*254 평면 생성
(설계영역)

재료 aluminum
(탄성계수 : 6.895E4 N/mm^2
프와송비 : 0.3
밀도 : 2.77E-6 kg/mm^3)

PSHELL → 두께 5.5 mm, 요소 크기 10 mm인 판 요소 생성

구속조건 및 하중조건 설정



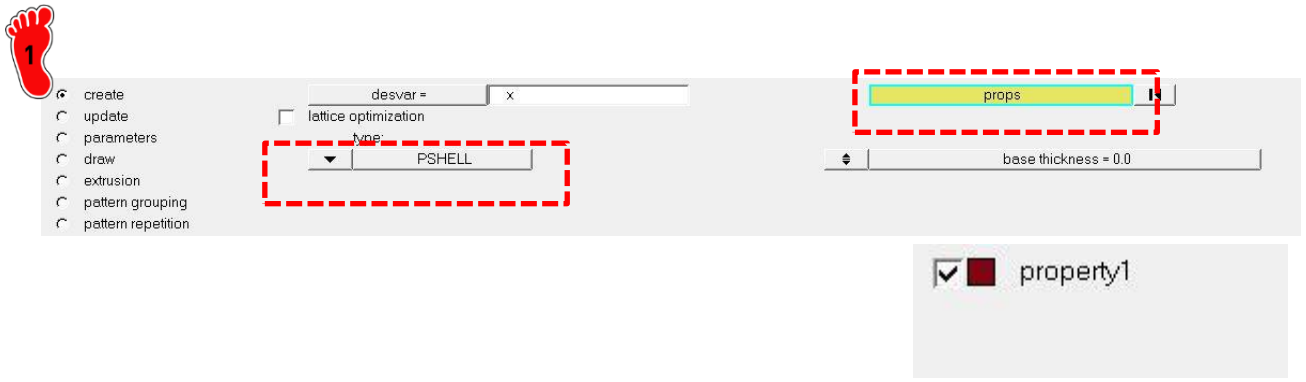
1 고정 구속 및 핀구속

2 문제에 주어진 하중 입력

F_{1x} = 22.241 kN ,
F_{1y} = -13.344 kN
F_{2y} = 4.448 kN

Load step 생성

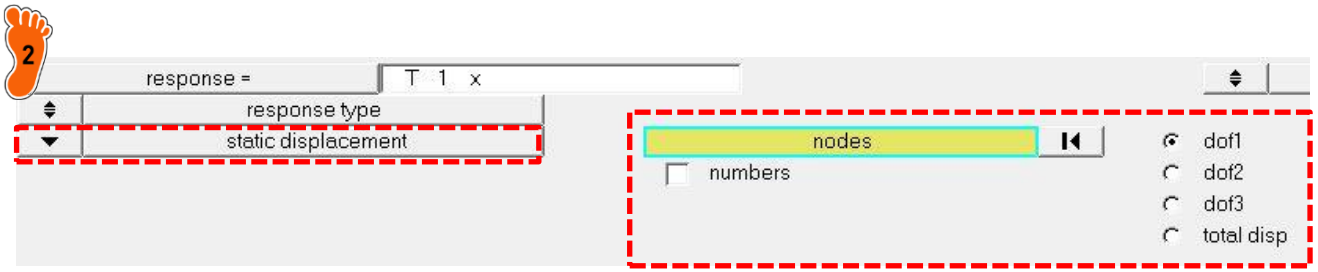
설계변수 및 응답설정



'Analysis' -> 'optimization' -> 'topology' 클릭하여 변수 생성

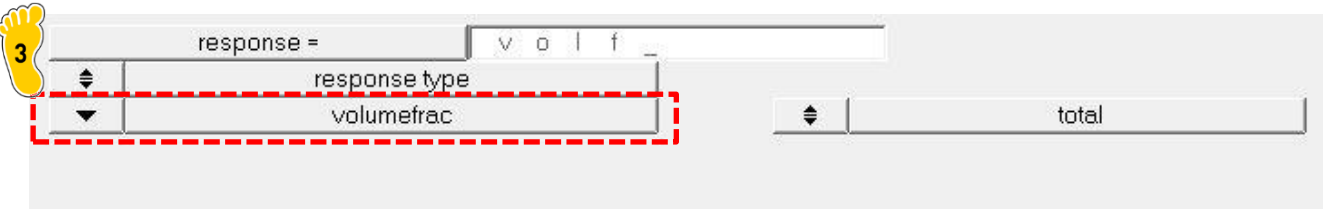
설계변수 이름 및 범위 설정

설계변수는 판의 두께



'Analysis' -> 'optimization' -> 'response' 클릭

조인트 1, 2에 대한 절점 변위 응답 설정 (Tx, Ty.): 4개



Volume fraction 설정

전체 부피 응답 설정

치수 최적화 설정: 변위 제약조건

1 'Analysis' -> 'optimization' -> 'dconstraints' 클릭

'response'에서 변위 응답 선택

'loadsteps' 설정

2 최대변위 제한조건 설정

총 4개의 변위 제약조건

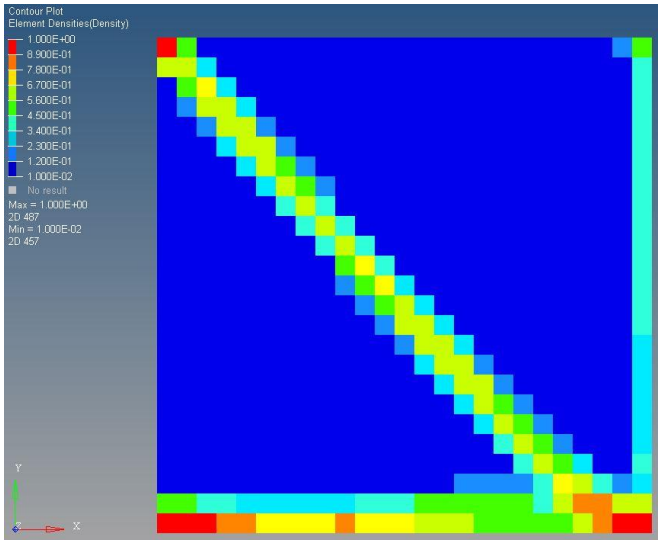
3 'Analysis' -> 'optimization' -> 'objective' 클릭

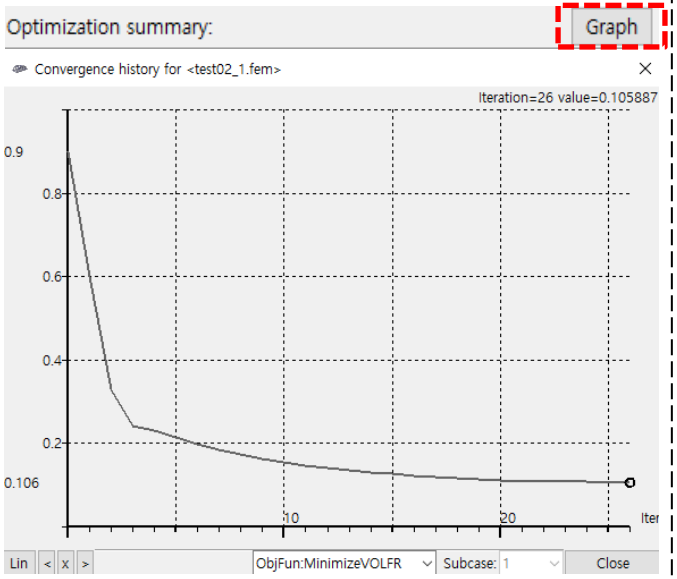
부피 최소화 설정

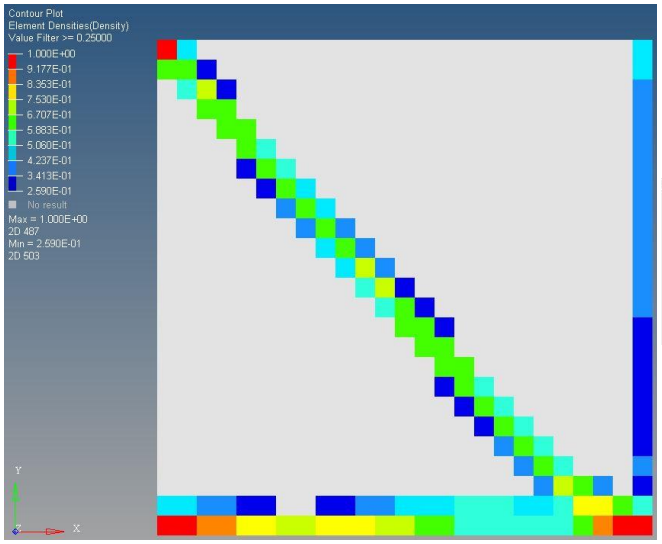
4 'Analysis' -> 'optimization' -> 'opti control' 기본값 설정

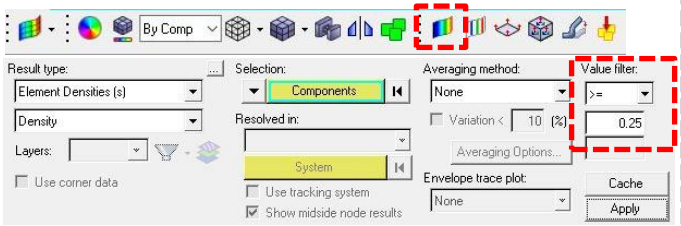
최적화 수행

위상 최적화 결과 확인



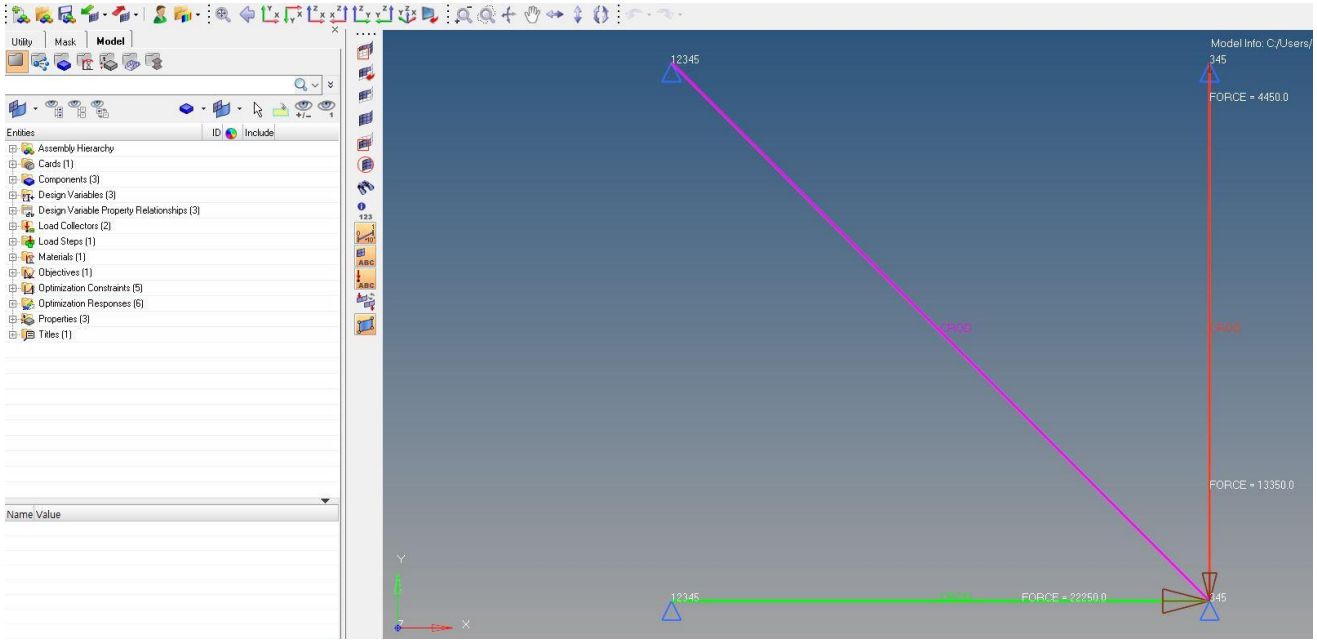






1 재료밀도 0.25 이상인 결과 확인 시
1, 3, 4번 부재만 표현되는 것을 확인

치수 최적화 설정



1 위상최적화에서 도출된 1, 3, 4번 부재만을 모델링하여 치수최적설계 수행

재료 물성치, 단면적 모델링, 경계조건 설정 등은 앞선 실습 예제와 동일하게 설정

치수최적설계 모델링 후, 최적설계 수행

치수 최적화 결과 확인

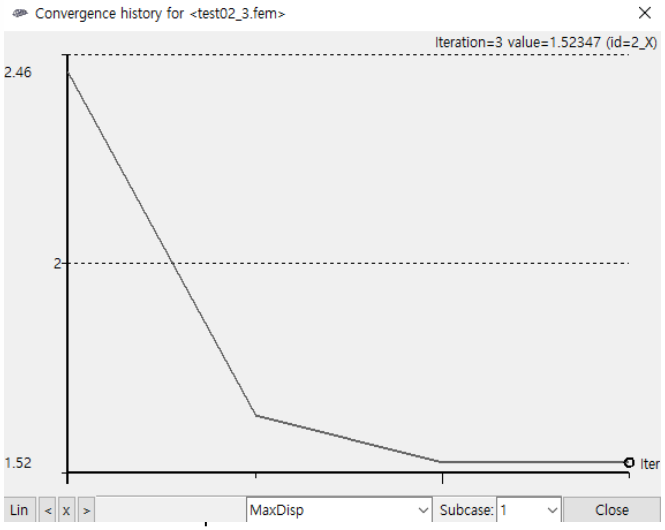
1 치수최적화 결과 확인

```
Objective Function (Minimize VOLUM) =  2.18683E+04   % change =         0.00
Maximum Constraint Violation %      =  0.12040E-03
Volume                              = 2.18683E+004   Mass      = 6.05753E-005

 Subcase    Compliance      Epsilon
       1  2.711363E+04  2.683505E-16

Note : Epsilon = Residual Strain Energy Ratio.
```

RETAINED RESPONSES TABLE

Response User-ID	Response Type	Response Label	Subcase /RANDPS /Model +Frqncy /Times	Grid/ Element/ MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg	Response Value	Objective Reference/ Constraint Bound		Viol. %
6	VOLUM	vol	--	--	TOTL	2.187E+04	MIN		
1	DISPL	T1x	1	2	TX	1.523E+00	< 1.524E+00		0.0 A
2	DISPL	T1y	1	2	TY	-1.522E+00	> -1.524E+00		0.0 A
5	STRES	stress	1	4	SA	4.137E+02	< 4.137E+02		0.0 A
5	STRES	stress	1	3	SA	4.134E+02	< 4.137E+02		0.0 A
5	STRES	stress	1	1	SA	4.136E+02	< 4.137E+02		0.0 A

Design Variable ID	Design Variable Label	Lower Bound	Design Variable	Upper Bound
1	x1	6.452E+00	3.228E+01	6.452E+01
2	x2	6.452E+00	3.045E+01	6.452E+01
3	x3	6.452E+00	1.076E+01	6.452E+01



치수 최적화 결과

		최적화 문제			
		참고 문헌	(1) 응력 제약	(2) 변위 제약	(3) 응력 & 변위
부피[mm^3]		2.6e4	2.2e4	2.1e4	2.2e4
최대 응력[MPa]		414.09	413.68	689.75	413.68
변위 [mm]	절점 1,x	1.52	1.52	1.52	1.52
	절점 1,y	-1.52	-1.52	-1.52	-1.52
	절점 2,x	0.001	0	0	0
	절점 2,y	-0.004	-0.001	1.02	0.002
변수 [mm^2]	A1	32.26	32.30	32.30	32.28
	A2	6.45	-	-	-
	A3	30.39	30.43	30.47	30.45
	A4	10.77	10.76	6.45	10.76
	A5	6.45	-	-	-

변위 제약조건 문제의 경우 변위는 만족하나 응력은 만족하지 못함

응력, 변위를 모두 고려한 경우 제약조건을 모두 만족하며, 앞서 5-bar 문제에 비해 부피도 감소한 것을 알 수 있음 (2.6e4→2.2e4)