

기계설계

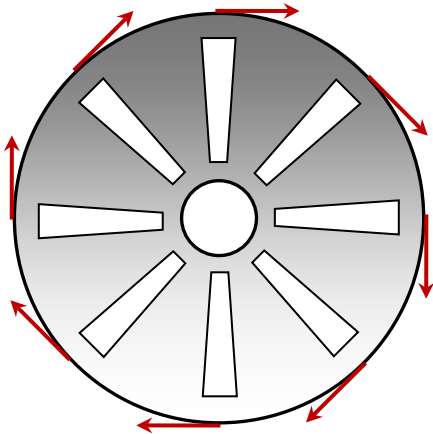
(2D 탄성론)

Hyungmin Jun, Ph. D.

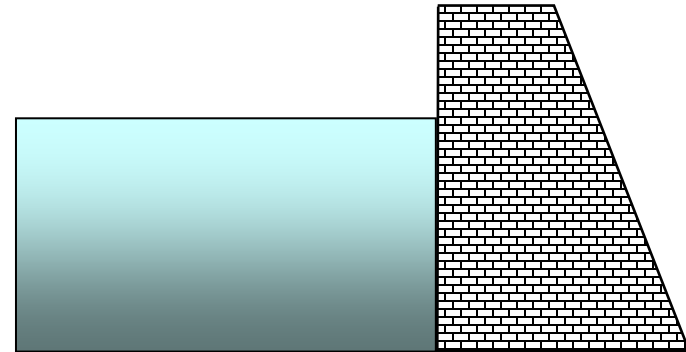
Multiphysics Systems Design Laboratory
Department of Mechanical System Engineering
Jeonbuk National University

- 많은 3차원 구조물들은 2차원적인 문제로 취급될 수 있다

< 2차원 탄성문제의 예 >



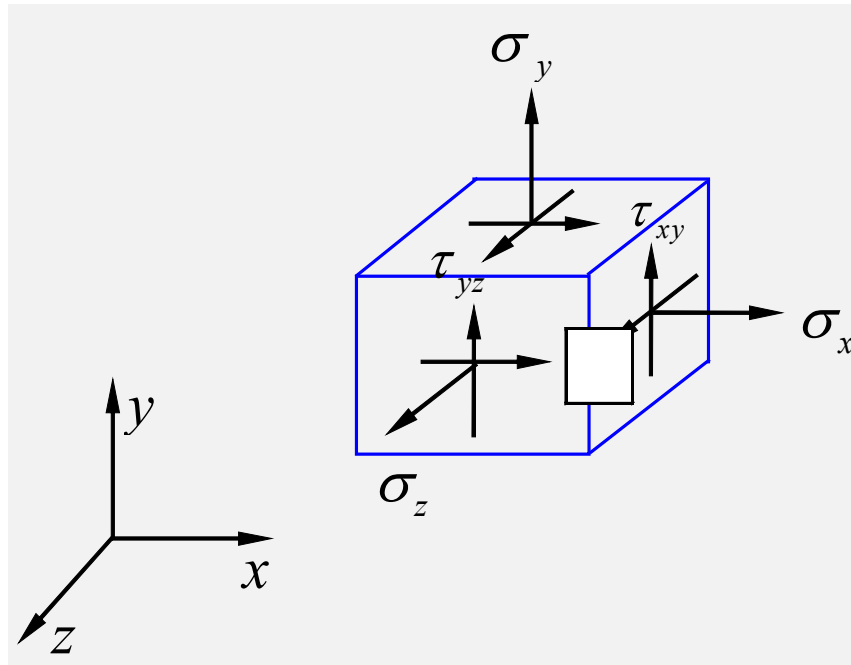
(a) 회전디스크



(b) 저수지 댐



- 일반적으로 구조물 내부의 한 점에서의 응력과 변형률은 6개의 독립적인 성분으로 구성



$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$$

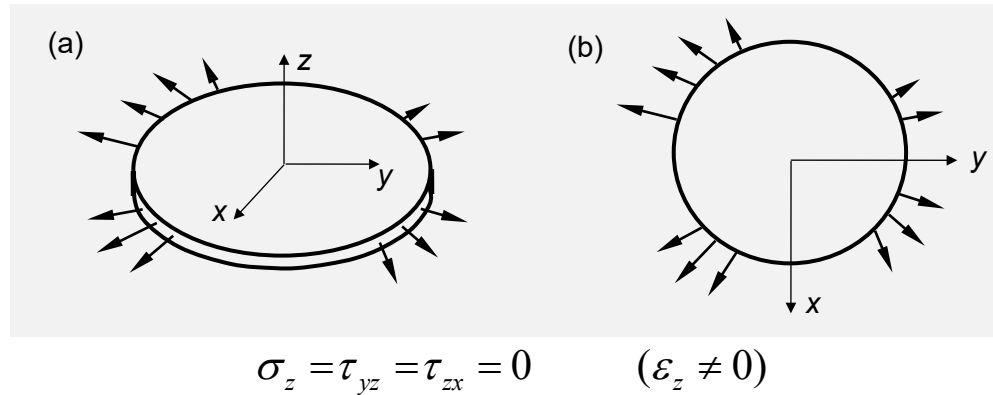
$$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$$

그림. 구조물 내부 임의점에서 응력성분

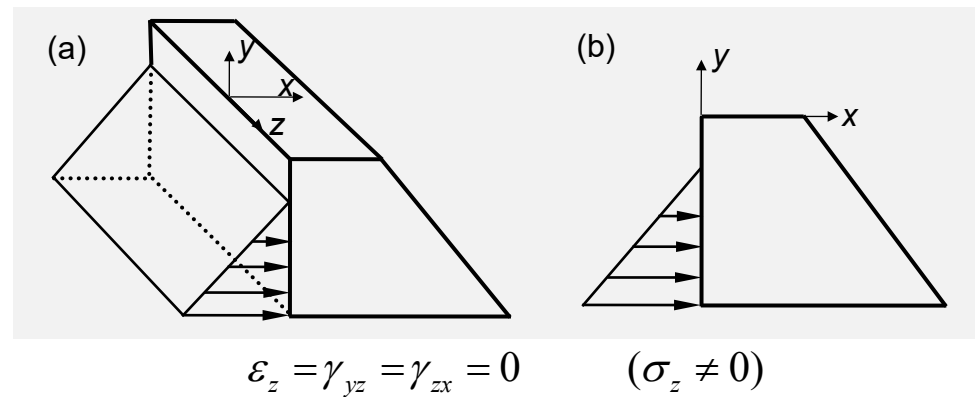


- 어떤 조건하에서는 3차원 응력해석은 2차원해석으로 수행될 수 있다

I. 평면응력 (Plane Stress)



II. 평면변형률 (Plane Strain)





□ 응력-변형률(구성) 방정식

✓ 평면응력

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \quad \text{또는} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{E}^{-1} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\varepsilon}_0$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \right) \quad \text{또는} \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\sigma}_0$$

✓ 평면변형률 $E \rightarrow \frac{E}{1-\nu^2}; \quad \nu \rightarrow \frac{\nu}{1-\nu}; \quad G \rightarrow G$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \right)$$



▣ 변형률과 변위 관계

✓ 미소 변형률과 미소 회전에 대하여 다음의 관계가 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

✓ 행렬 형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 \\ 0 & \partial / \partial y \\ \partial / \partial y & \partial / \partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad \text{또는} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u}$$



□ 평형방정식

✓ 평면 탄성론에서 구조물 내의 응력은 다음의 평형방정식을 만족시켜야 한다.

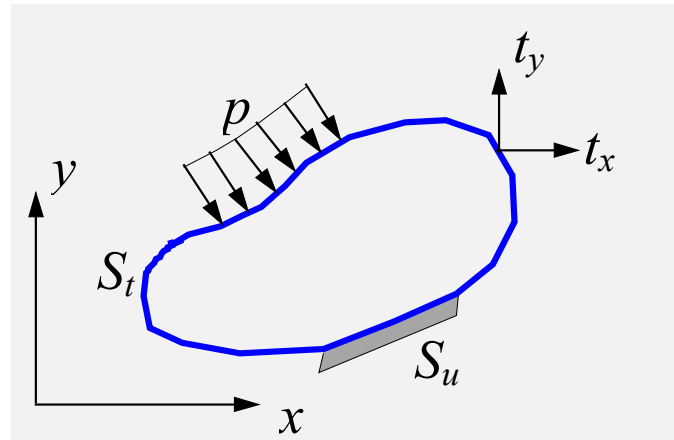
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y = 0$$

✓ 여기서 f_x 와 f_y 는 체적력(body force)이며, 중력과 같이 단위체적당 힘



□ 경계조건 (Boundary Conditions)

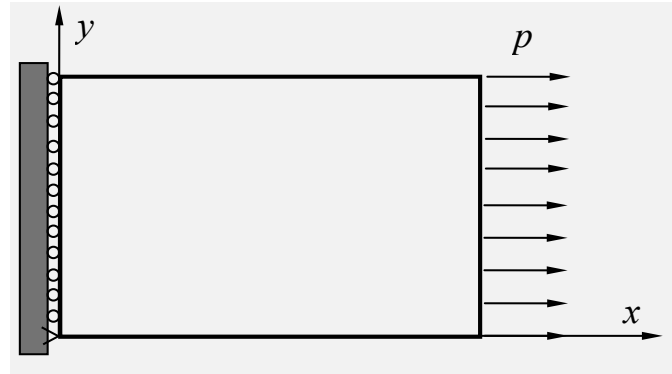


$$\begin{aligned} u &= \bar{u}, & v &= \bar{v}, & \text{on } S_u \\ t_x &= \bar{t}_x, & t_y &= \bar{t}_y, & \text{on } S_t \end{aligned}$$



▣ 엄밀 탄성론 해 (Exact Elasticity Solution)

▣ 예제 4.1



✓ 이 간단한 문제의 엄밀해는 다음과 같다.

✓ 변위: $u = \frac{p}{E}x, \quad v = -\nu \frac{p}{E}y$

✓ 변형률: $\varepsilon_x = \frac{p}{E}, \quad \varepsilon_y = -\nu \frac{p}{E}, \quad \gamma_{xy} = 0$

✓ 응력: $\sigma_x = p, \quad \sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0$

✓ 간단한 문제의 엄밀 (또는 해석적) 해는 극히 한정됨. 일반적인 2D 탄성 문제의 해를 구하기 위해 FEM 사용

2차원 탄성론 문제 모델링

□ Finite element discretization of a planar surface

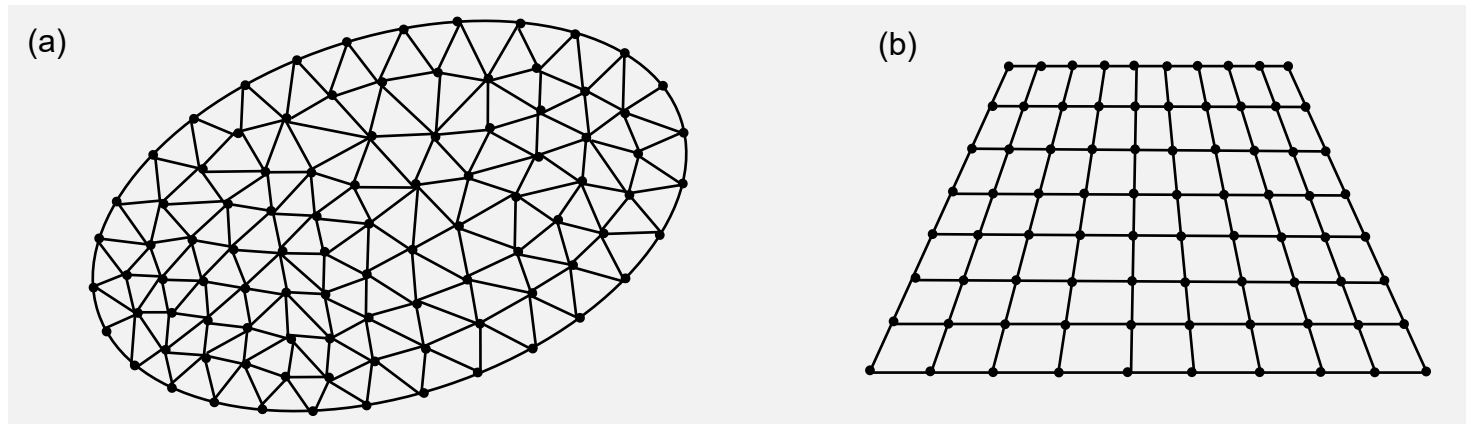


그림. Finite element discretization: (a) Unstructured (free) mesh; and (b) Structured (mapped) mesh.



- 지지 조건은 강체 운동을 억제하기 위해 필요

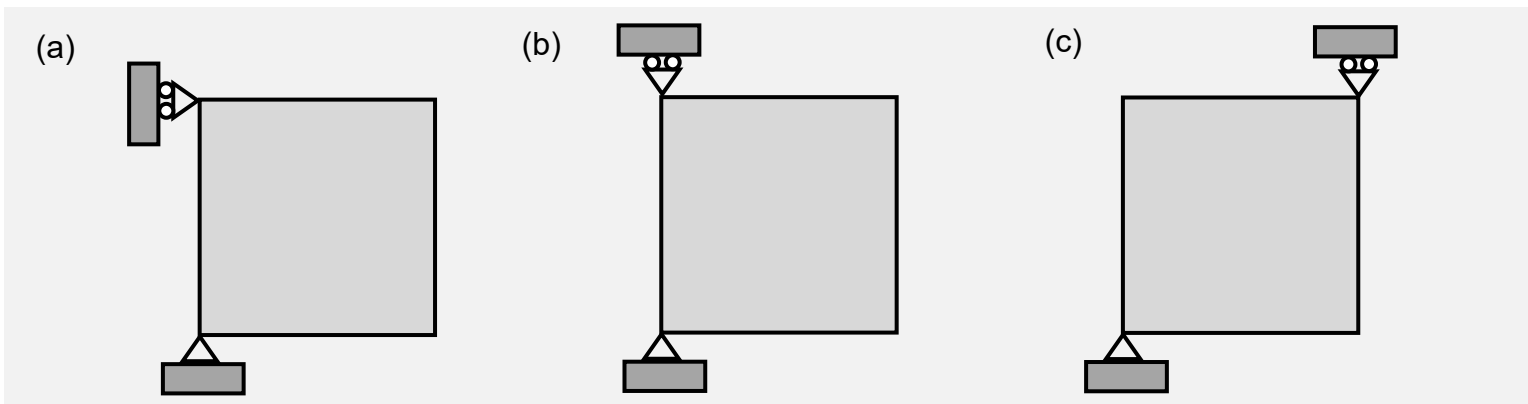


그림. 2차원에서 지지조건: (a), (c) 효과적인 구속 ; (b) 비효과적인 구속



□ 강성행렬의 일반적 공식

✓ 평면요소에서 변위(u, v)는 다음과 같이 형상함수 N_i 를 이용하여 절점변위(u_i, v_i)로부터 보간

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad \text{or} \quad \mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{d}$$

✓ 여기서 N 은 형상함수 행렬, u 는 변위 벡터, d 는 절점 변위벡터

✓ 변형률 벡터는,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{u} = \mathbf{D} \mathbf{N} \mathbf{d}, \quad \text{or} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{d}$$

✓ 여기서 $\mathbf{B} = \mathbf{D} \mathbf{N}$ 은 변형률-변위 행렬



✓ 하나의 요소에 저장된 변형 에너지를 고려하면,

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV \\ &= \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \mathbf{d} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{k} \mathbf{d} \end{aligned}$$

✓ 이로부터 요소강성행렬에 대한 일반적인 공식은,

$$\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV$$



□ 일정 변형률 삼각형 (Constant Strain Triangle): CST 또는 T3

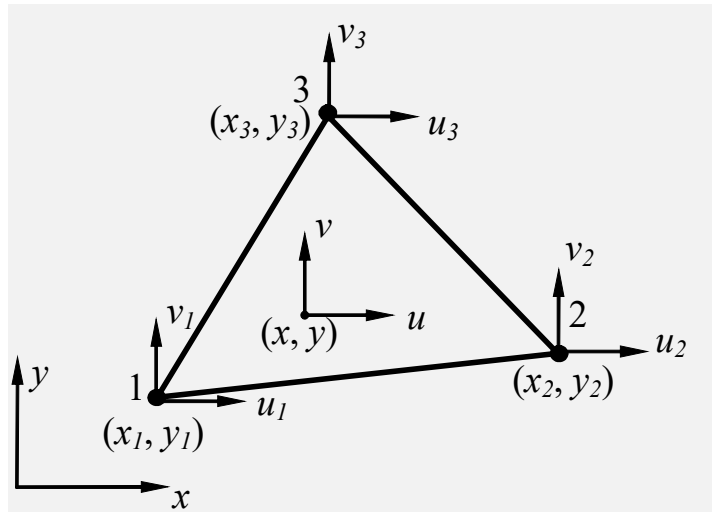


그림. 선형 삼각형 요소 (T3)

$$u = b_1 + b_2x + b_3y, \quad v = b_4 + b_5x + b_6y$$

$$\varepsilon_x = b_2, \quad \varepsilon_y = b_6, \quad \gamma_{xy} = b_3 + b_5$$



✓ 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}$$

$$N_1 = \frac{1}{2A} \{ (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y \}$$

$$N_2 = \frac{1}{2A} \{ (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y \}$$

$$N_3 = \frac{1}{2A} \{ (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y \}$$

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} : \text{삼각형의 면적}$$

✓ 변형률-변위 관계를 이용하면, 다음 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{d} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}$$

여기서

$$x_{ij} = x_i - x_j, y_{ij} = y_i - y_j \quad (i, j = 1, 2, 3).$$

✓ CST에 대한 요소 강성행렬

$$\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV = tA(\mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B})$$

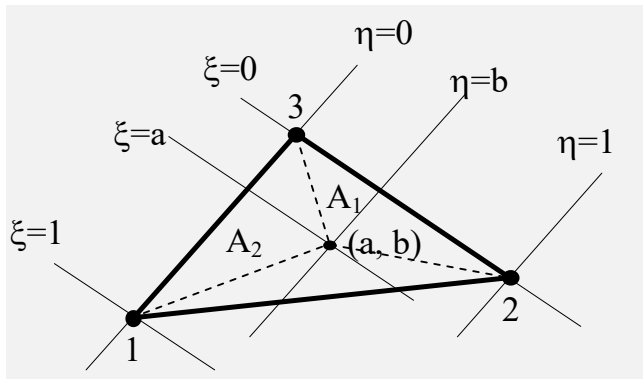


그림. 삼각형에 정의된 자연좌표계

✓ 자연좌표계(natural coordinates) (ξ, η)

$$\xi = A_1 / A, \eta = A_2 / A$$

✓ 형상함수(shape functions)는,

$$N_1 = \xi, \quad N_2 = \eta, \quad N_3 = 1 - \xi - \eta$$

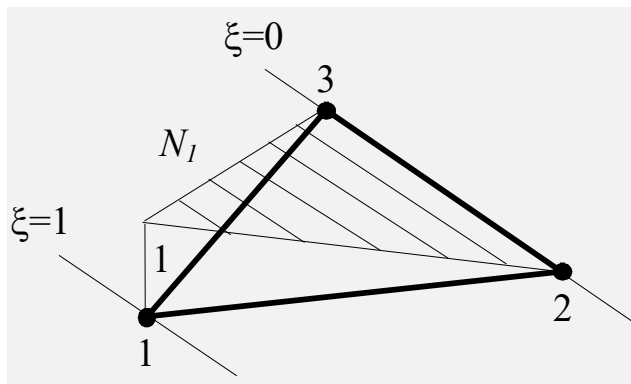


그림. T3 요소에서 형상함수 N1의 변화

✓ 다음 관계식을 주목 $N_1 + N_2 + N_3 = 1$

$$N_i = \begin{cases} 1, & \text{at node } i; \\ 0, & \text{at other nodes} \end{cases}$$



✓ 두개의 좌표계: 전체좌표계(x, y), 그리고 자연(국소)좌표계 (ξ, η)

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 \end{aligned}$$

or

$$\begin{aligned} x &= x_{13} \xi + x_{23} \eta + x_3 \\ y &= y_{13} \xi + y_{23} \eta + y_3 \end{aligned}$$

여기서 $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j$ ($i, j = 1, 2, 3$)

✓ 요소에서 변위 u 또는 v 는 (x, y) 또는 (ξ, η)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

여기서

$\mathbf{J}$ 는 변환에 관한 야코비행렬 (Jacobian matrix)

✓ 다음 식을 계산

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_{13} & y_{13} \\ x_{23} & y_{23} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{bmatrix}$$

$$\det \mathbf{J} = x_{13} y_{23} - x_{23} y_{13} = 2A$$



✓ 이 관계식을 이용

$$\varepsilon = \mathbf{D}\mathbf{u} = \mathbf{D}\mathbf{N}\mathbf{d} = \mathbf{B}\mathbf{d}$$

✓ 다음의 변형률-변위 행렬을 얻는다.

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix}$$

▣ 요소와 관련하여 다음 사항을 유의

- ✓ 변형률 구배가 작은 영역에서 사용
- ✓ 메쉬 전환 영역 (미세 메쉬에서 거친 메쉬)에 사용
- ✓ 응력 집중 또는 구멍과 모서리의 가장자리와 같은 구조의 다른 중요한 영역에서 CST를 사용을 피함
- ✓ 2차원 문제의 신속하고 예비 FE 분석에만 권장



□ 2차 삼각형요소(Quadratic Triangular Element): LST 또는 T6

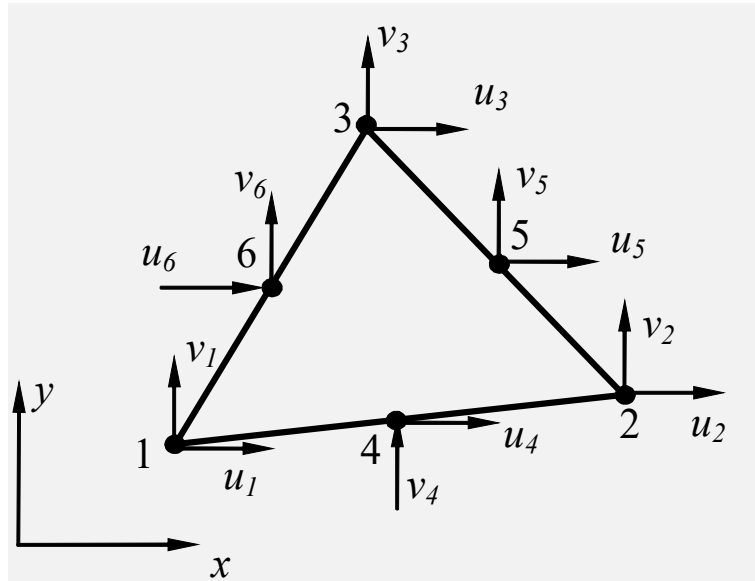


그림. 2차 삼각형 요소 (T6)

$$u = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2$$

$$v = b_7 + b_8x + b_9y + b_{10}x^2 + b_{11}xy + b_{12}y^2$$

$$\varepsilon_x = b_2 + 2b_4x + b_5y$$

$$\varepsilon_y = b_9 + b_{11}x + 2b_{12}y$$

$$\gamma_{xy} = (b_3 + b_8) + (b_5 + 2b_{10})x + (2b_6 + b_{11})y$$



✓ 자연좌표계(natural coordinate)에서 형상함수

$$N_1 = \xi(2\xi - 1), \quad N_2 = \eta(2\eta - 1)$$

$$N_3 = \zeta(2\zeta - 1), \quad N_4 = 4\xi\eta$$

$$N_5 = 4\eta\zeta, \quad N_6 = 4\zeta\xi$$

✓ 여기서 $\zeta = 1 - \xi - \eta$

✓ 변위장에 관한 식은 $u = \sum_{i=1}^6 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^6 N_i v_i$

✓ 요소강성행렬은 $\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV$

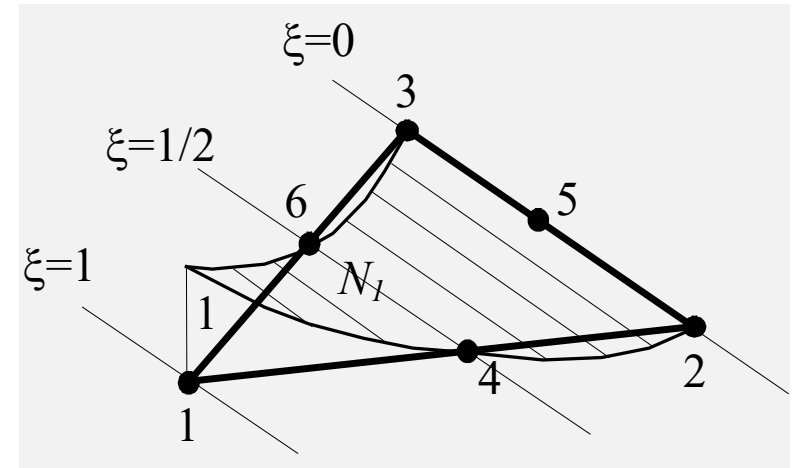


그림. 형상함수 N1 의 변화



□ 선형4변형요소 (Linear Quadrilateral Element): Q4

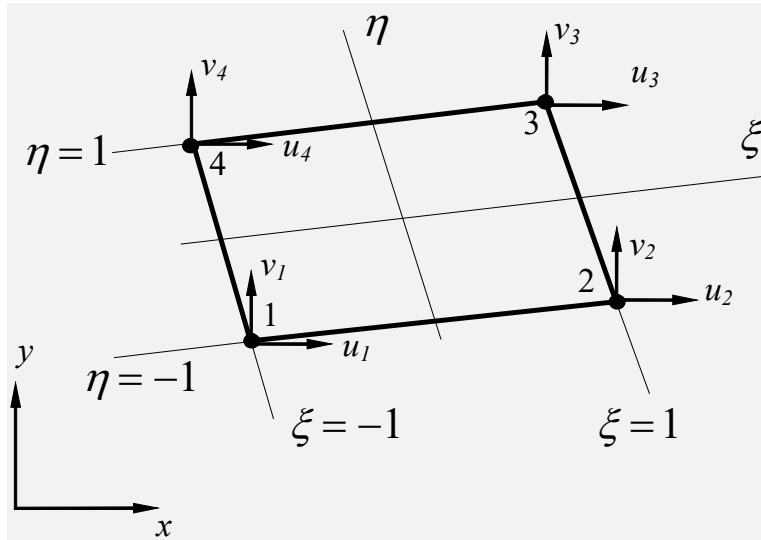


그림. 선형 4변형 요소 (Q4)

✓ 4개의 형상함수는, $\sum_{i=1}^4 N_i = 1$

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta), \quad N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta), \quad N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)$$

✓ 변위장에 관한 식은,

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^4 N_i v_i$$



□ 2차 4변형 요소 (Q8)

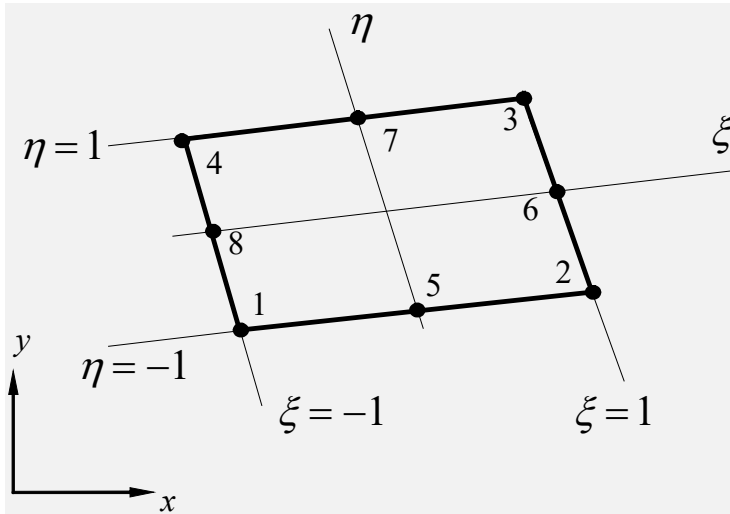


그림. 2차 4변형 요소 (Q8)

✓ 변위장에 관한 식은,

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^8 N_i v_i$$

✓ 8개의 형상함수는,

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(\eta-1)(\xi+\eta+1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(\eta-1)(\eta-\xi+1)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(\xi-1)(\eta+1)(\xi-\eta+1)$$

$$N_5 = \frac{1}{2}(1-\eta)(1-\xi^2)$$

$$N_6 = \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2)$$

$$N_7 = \frac{1}{2}(1+\eta)(1-\xi^2)$$

$$N_8 = \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2)$$

$$\sum_{i=1}^8 N_i = 1$$



- 2차원 요소를 사용할 때 다음 사항에 유의
 - ✓ Q4와 T3는 선형 요소 메시에서 보통 함께 사용
 - ✓ Q8과 T6는 2차 요소로 구성된 메시에서 보통 적용
 - ✓ 선형요소는 변형해석, 즉 거시적 반응을 결정할 필요가 있을 경우 유용
 - ✓ 이차 요소는 응력해석, 곡면 경계와 같은 복잡한 형상 모델링에서의 높은 정확성과 유연성으로 인하여 선호

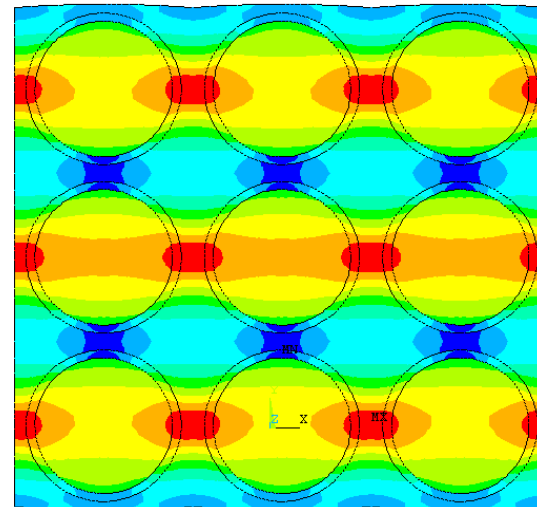
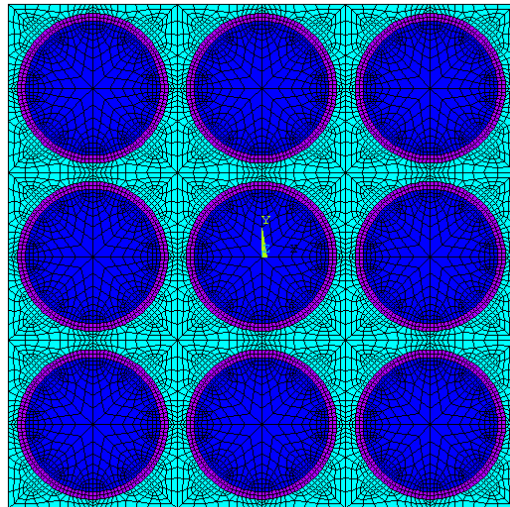
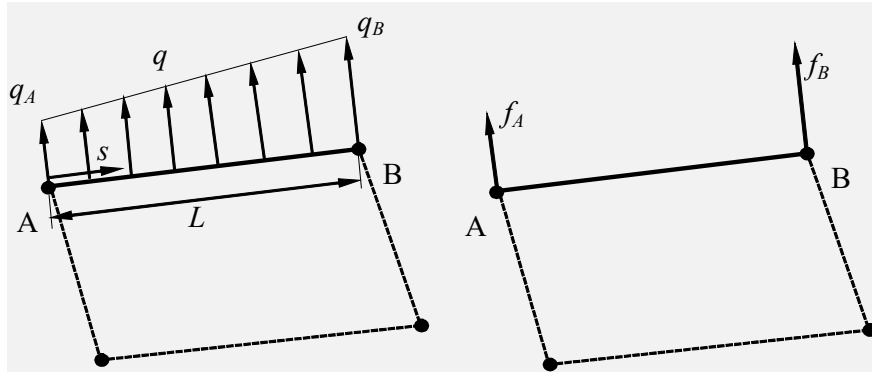


그림. 복합 재료 해석 (메쉬 및 응력분포도)



하중의 변환



✓ Q4 요소의 가장자리에 가해진 트랙션 q에 의해 행해진 일(work done)은,

$$\begin{aligned}
 W_q &= \frac{1}{2} t \int_0^L \left(\begin{bmatrix} u_{nA} & u_{nB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-s/L \\ s/L \end{bmatrix} \right) \left(\begin{bmatrix} 1-s/L & s/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \end{bmatrix} \right) ds \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{nA} & u_{nB} \end{bmatrix} t \int_0^L \begin{bmatrix} (1-s/L)^2 & (s/L)(1-s/L) \\ (s/L)(1-s/L) & (s/L)^2 \end{bmatrix} ds \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{nA} & u_{nB} \end{bmatrix} \frac{tL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{nA} & u_{nB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_A \\ f_B \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

✓ 선형변위 및 트랙션(traction)

$$u_n(s) = (1 - s/L)u_{nA} + (s/L)u_{nB}$$

$$q(s) = (1 - s/L)q_A + (s/L)q_B$$

✓ 등가의 절점 벡터

$$\begin{Bmatrix} f_A \\ f_B \end{Bmatrix} = \frac{tL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_A \\ q_B \end{Bmatrix}$$

✓ 일정한 q에 대해, 다음 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} f_A \\ f_B \end{Bmatrix} = \frac{qtL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$



▣ 응력 계산

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{E} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{E} \mathbf{B} \mathbf{d}$$

✓ 폰 미제스 응력: $\sigma_e \leq \sigma_y$

$$\text{여기서 } \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

✓ 2차원 문제에서 평면내 주응력은 다음 식으로 결정

$$\sigma_1^P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$
$$\sigma_2^P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

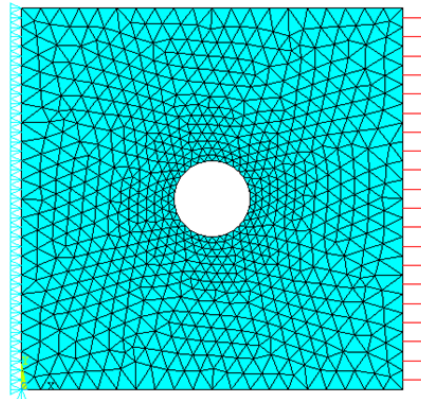
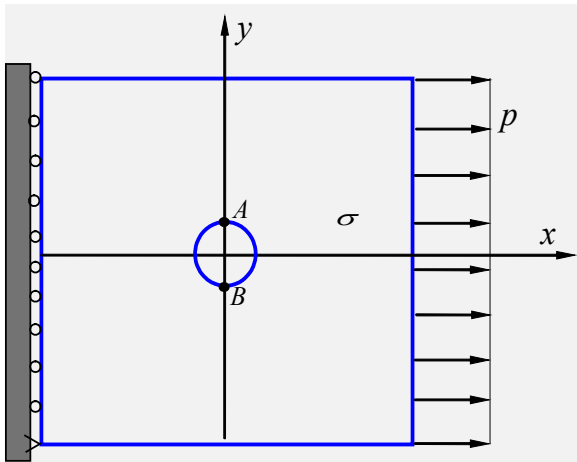
✓ 평면응력 조건에서

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 - 3(\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2)}$$

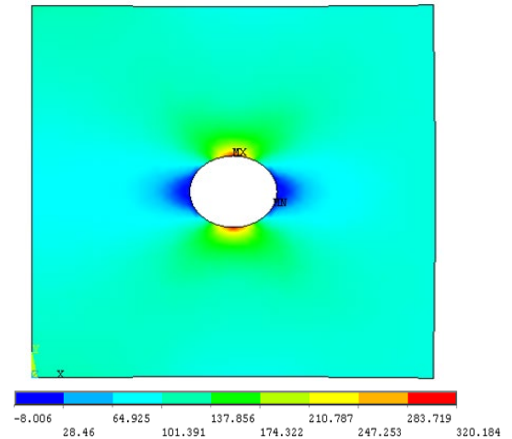


예제 4.2

✓ 정사각형 판의 중앙에 구멍이 있고, x 방향으로 인장력 p 를 받는다.



FE mesh (T6, 1518 elements)

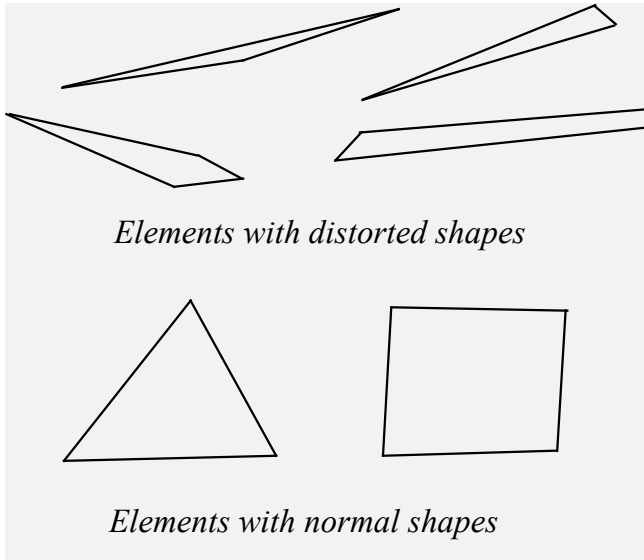


stress plot and deformed shape

Elem. Type	No. of Elem.	Total DOFs	Max stress (psi)
Q4	506	1102	312.42
Q4	3352	7014	322.64
Q4	31349	64106	322.38
...	...	...	...
T6	1518	6254	320.18
T6	2562	10494	321.23
T6	24516	100702	322.24
...	...	...	...
Q8	501	3188	320.58
Q8	2167	13376	321.70
Q8	14333	88636	322.24



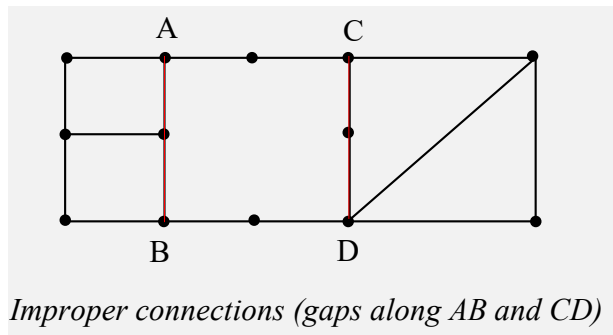
□ 2차원 요소에 대한 일반적인 사항



✓ 각 요소 형태의 속성을 숙지:

- T3 와 Q4: 선형 변위, 일정 변형률과 응력
- T6 와 Q8: 2차 변위, 선형 변형률과 응력

✓ 주어진 문제에 대하여 올바른 요소 형태를 선택.
의심스러운 경우 고차 요소(T6 또는 Q8)나 더 미세한 메시를 사용

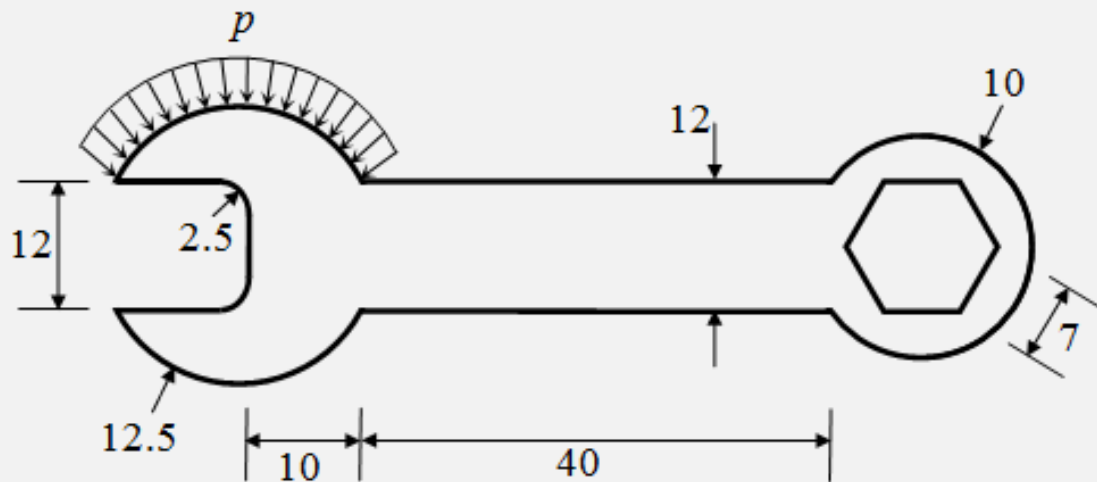


✓ 큰 형상비(aspect ratios)와 모서리 각도를 갖는 요소를 피하라.

✓ 요소가 적절히 연결되어 있는지 확인하라.

ANSYS Workbench를 이용한 사례연구

<문제설명> 콤비네이션 렌치는 잠금장치를 풀거나 조이기 위해 토크를 적용하는 데 사용되는 편리한 도구이다. 아래에 표시된 렌치는 스테인레스 강재로 만들어졌으며 두께는 3 mm이다. 주어진 분포하중 및 경계조건에서 최대변형 과 및 von Mises 응력 분포를 결정하라.



Material: Stainless Steel

$E = 193 \text{ GPa}$

$\nu = 0.27$

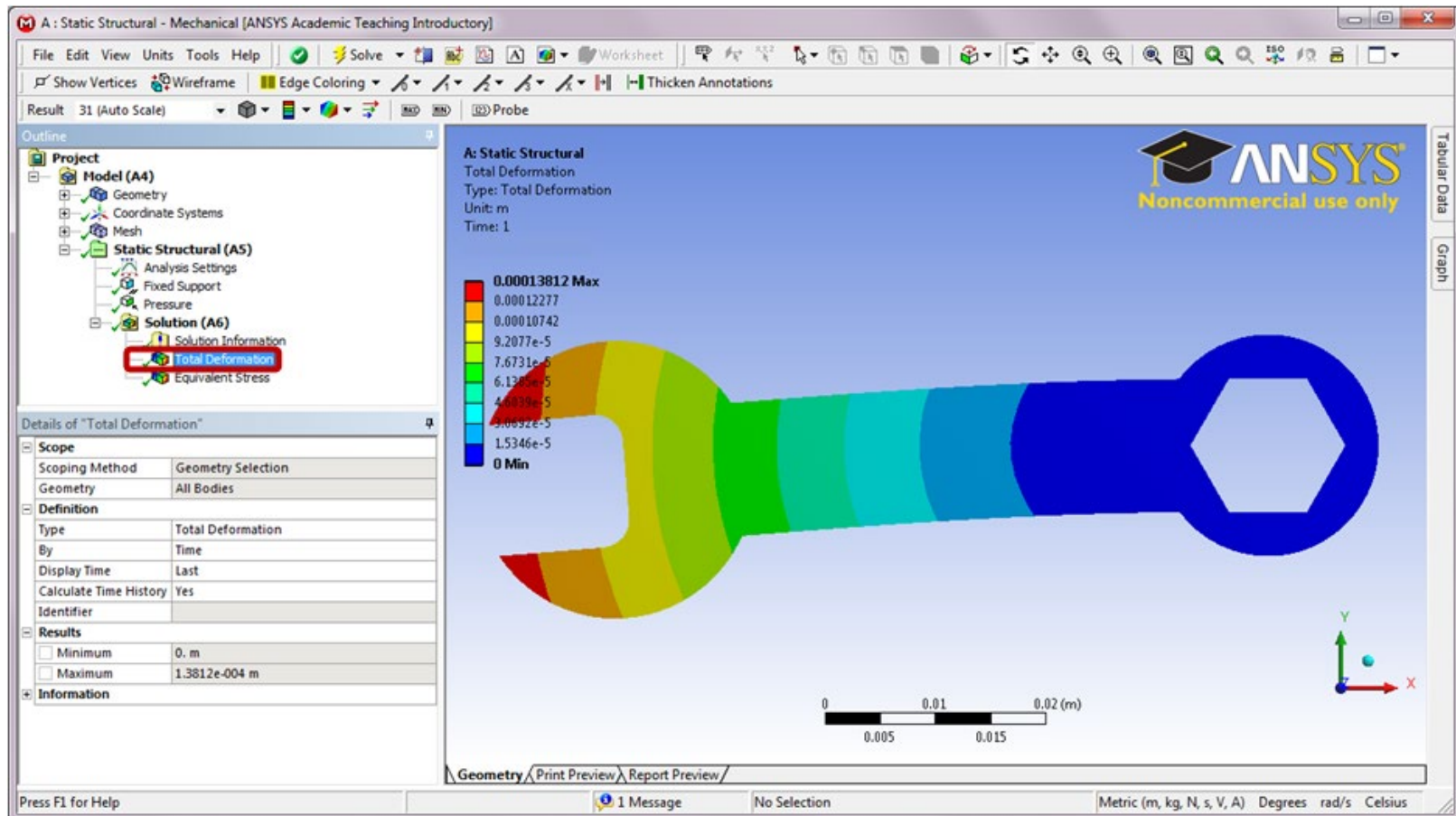
Boundary Conditions:

Hexagon on the right end is fixed on all sides.

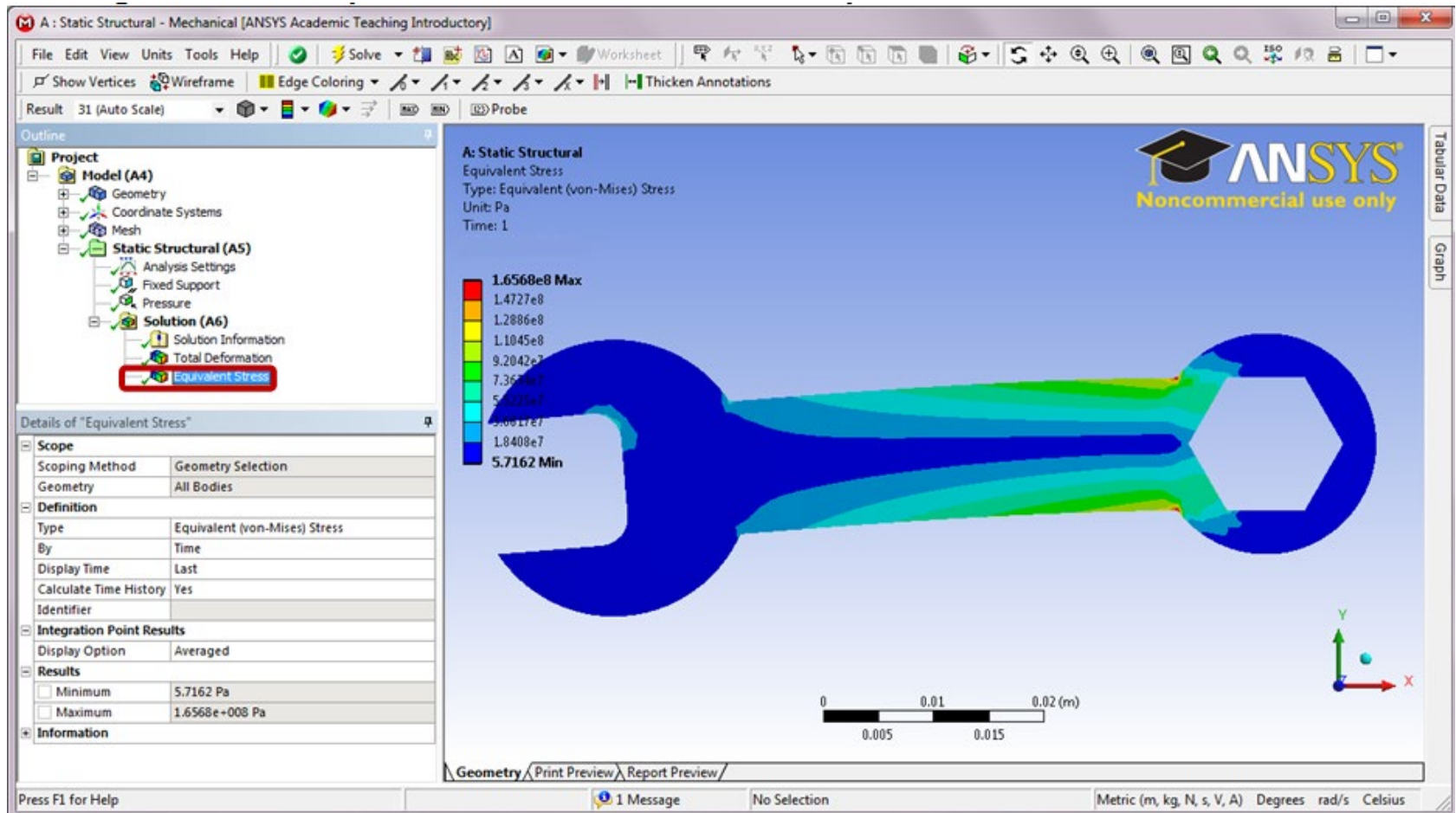
Pressure $p = 2 \text{ MPa}$

(All units are in millimeters.)

Static Structural Analysis (정적 구조해석)을 실행하여 렌치의 변형 결과를 검토하시오.



Outline에서 Equivalent Stress를 선택하여 von-Mises 응력 분포를 검토한다.



▣ 이 장에서는 학습한 내용은 다음과 같다.

- ✓ 2차원 탄성 방정식을 검토하고, 평면 응력 및 평면 변형 문제를 분석하기 위한 2차원(2-D) 요소에 대해 설명.
- ✓ 2차원 응력해석을 위한 유한요소(FE) 공식을 소개. 선형 삼각형 (T3) 및 선형 사변형 (Q4) 요소는 변위분석(deformation analysis)에 적합하나 응력해석(stress analysis)에는 정확하지 않음을 강조.
- ✓ 응력해석에는 2 차 삼각형 (T6) 및 2 차 사변형 (Q8) 요소를 권장. FE 메쉬에서 큰 종횡비(aspect ratios) 또는 너무 크거나 작은 각을 갖는 특별한 형태의 요소사용은 피해야 함.
- ✓ ANSYS Workbench에서 렌치 모델을 만들고, 2차원(2-D) FEA를 수행하여 응력해석하는 과정을 설명.