

MTS

MECHANICAL
TOTAL
SOLUTION

MIDAS

CAE Basic Class

Structural Analysis



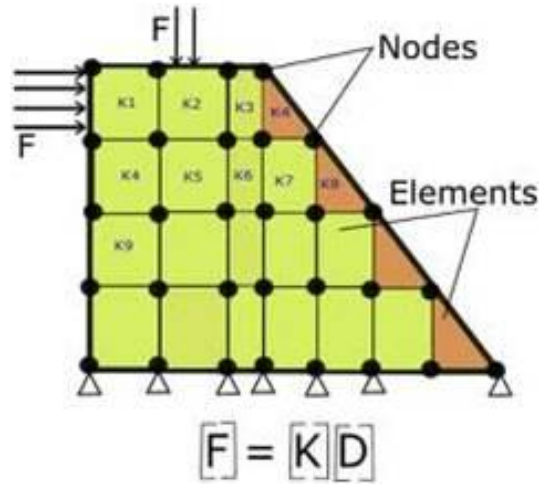
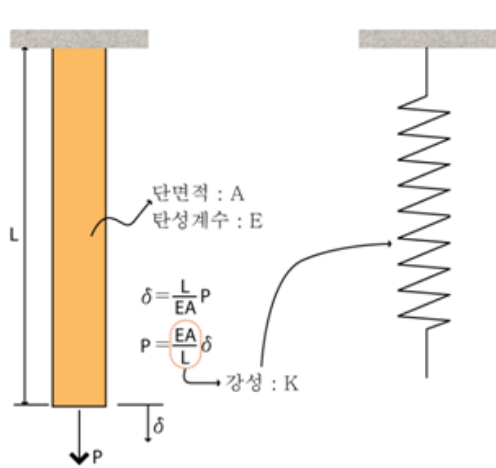
1강

구조 해석 개념 이해

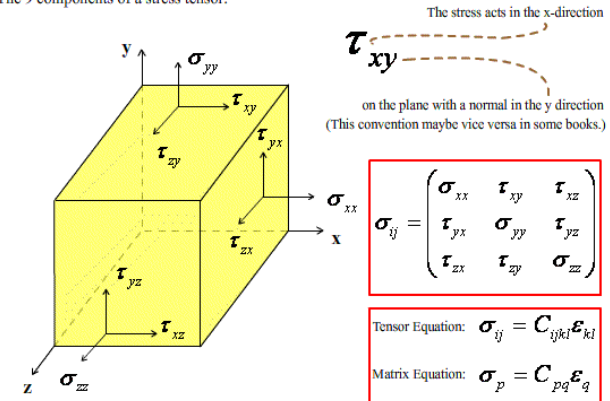




- ✓ 물리현상을 어떻게 모델링할 것인가?
- ✓ 어떤 해석이 필요한가?
 - 정적/동적 해석: 모드해석, 과도응답, 주파수 응답, 응답스펙트럼, ...
 - 선형/비선형 해석
- ✓ 어떤 요소를 사용해야 하는가?
 - 솔리드, 셸, 보, 스프링, 집중질량, 감쇠, 강체 요소, ...
 - 저차/고차 요소, 삼각/사각 요소
- ✓ 경계조건은 어떻게 설정해야 하는가?
 - 집중하중, 분포하중, 접촉, 조인트 접합부, 강체운동, ...
- ✓ 해석 결과를 어떻게 판단할 수 있는가?
 - 근사해, 정확한 해, 수렴성
- ✓ 설계변경을 하면 어떻게 될까?
 - 리모델링?



The 9 components of a stress tensor:

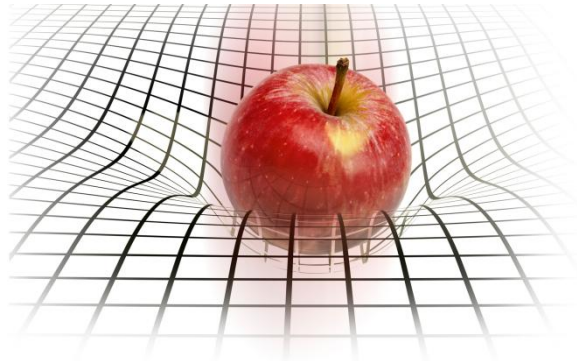


유한 요소법의 이해

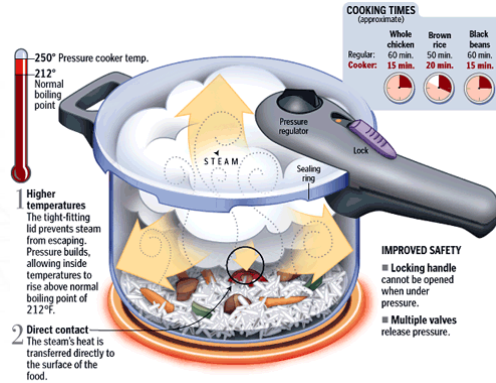
설계 해석에 필수적인 유한요소해석의 기본개념과 해석 절차에 대해 소개합니다.

해석에 필요한 공학적 지식과 해석 개념을 학습하여

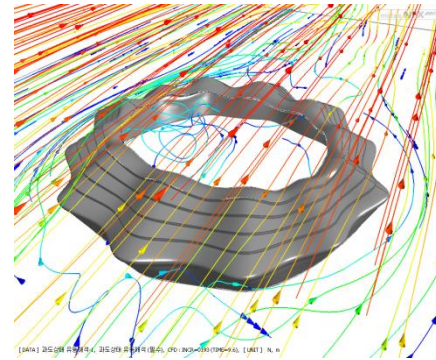
깊이 있고 신뢰성 있는 해석을 수행할 수 있는 기초를 다질 수 있습니다.



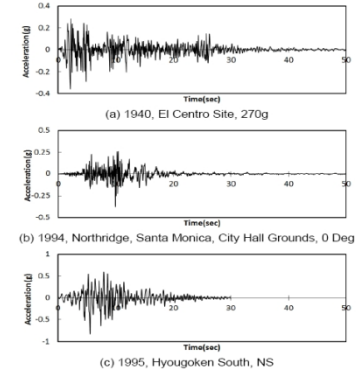
Gravity



Pressure Temperature



Wind

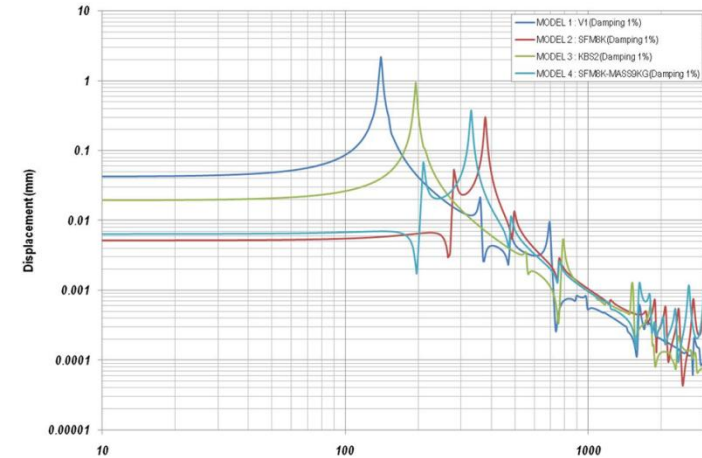
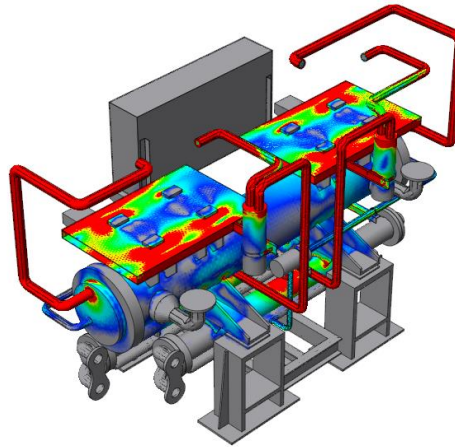
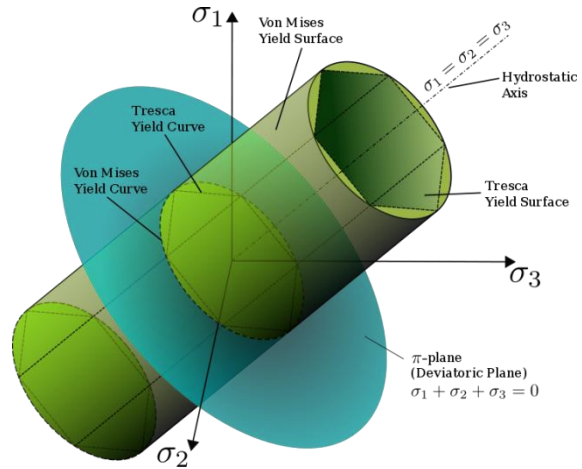


Earthquake

해석 종류별 하중과 경계 조건 정의 방법

용도에 맞는 하중, 경계조건의 지정 방법에 대해 설명하고,
강성/열/진동해석에 사용되는 하중/경계조건 및 활용예를 소개합니다.

유한요소 해석법의 다양한 해석 기능을 이해하여 설계제품에 적합한 해석 기능을 선택할 수 있으며,
설계 조건에 부합하는 하중 및 경계조건을 정의할 수 있습니다.



올바른 해석 결과 분석 방법

다양한 해석결과의 종류와 의미, 그리고 올바른 분석, 평가방법에 대해 설명합니다.

주요 해석 종류별 기초 역학 이론을 이해하실 수 있으며,

이론적 배경을 근간으로 한 해석 결과 분석을 통하여 합리적인 설계 변경 안을 도출할 수 있습니다.

CONTENTS

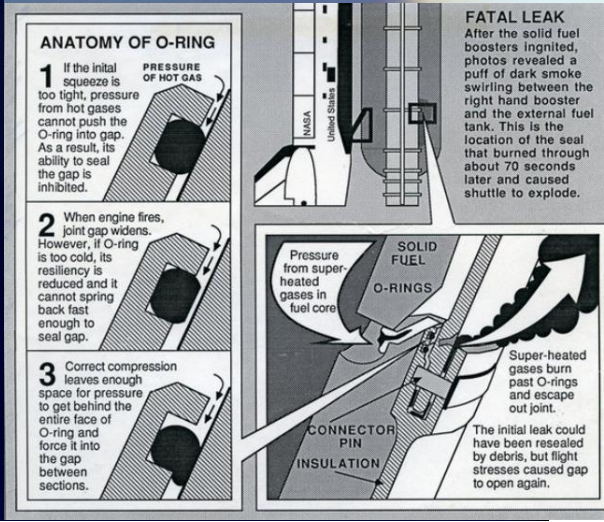
구조 해석 개념 이해

Part 1. 공학적 문제해결 방법 소개

Part 2. 구조해석에 대한 이해

Part 3. 유한요소해석에 대한 이해

챌린저호 폭발사고



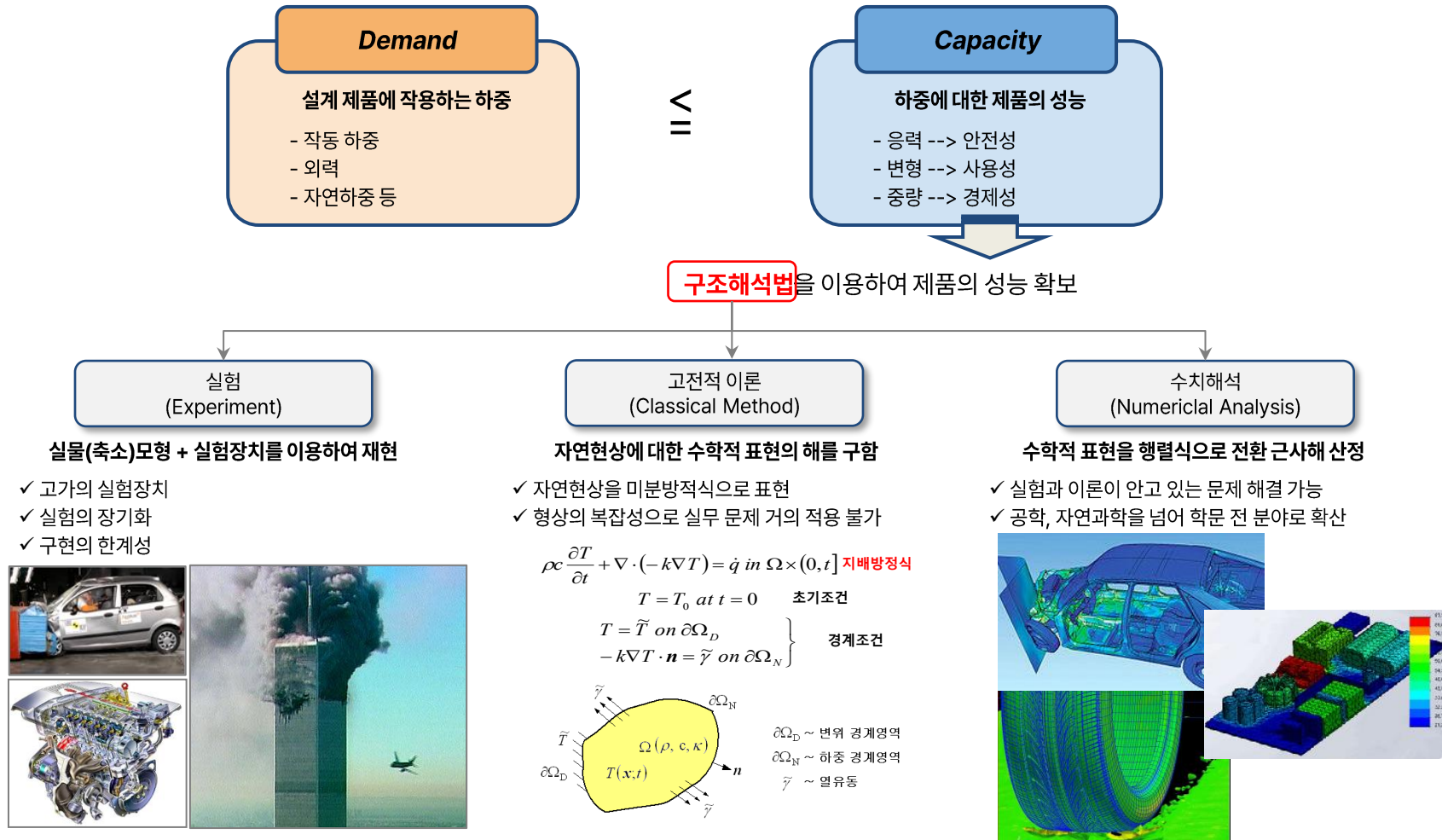
“공학적인 측면에서는, 우주왕복선 같은 복잡한 시스템에서도 고무링과 같이 기본적인 부품의 역할이 얼마나 중요한지, 또한 훌륭한 설계가 어떤 것인지에 대해 다시 한 번 생각해 볼 수 있는 기회가 되었다.”

타코마교 붕괴 사고



“그것은 단지 교량관계
전문가들도 공기역학적
(aerodynamics) 및 동적
진동의 지식을 급속히
발전하는 구조설계의 지식과
발전을 제때에 결합하여
적용하는 것을 아주 소홀히
한데서 비롯된 것이다.”

공학적 문제 (Engineering Problem) 해결 방법



실험적 방법에 의한 구조해석

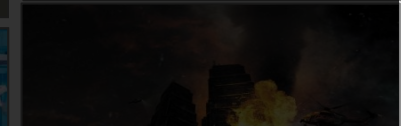
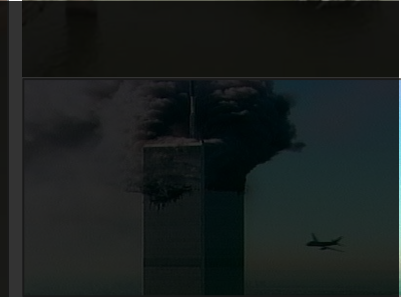


실물/축소 모형 및 실험장치를 이용한 재현

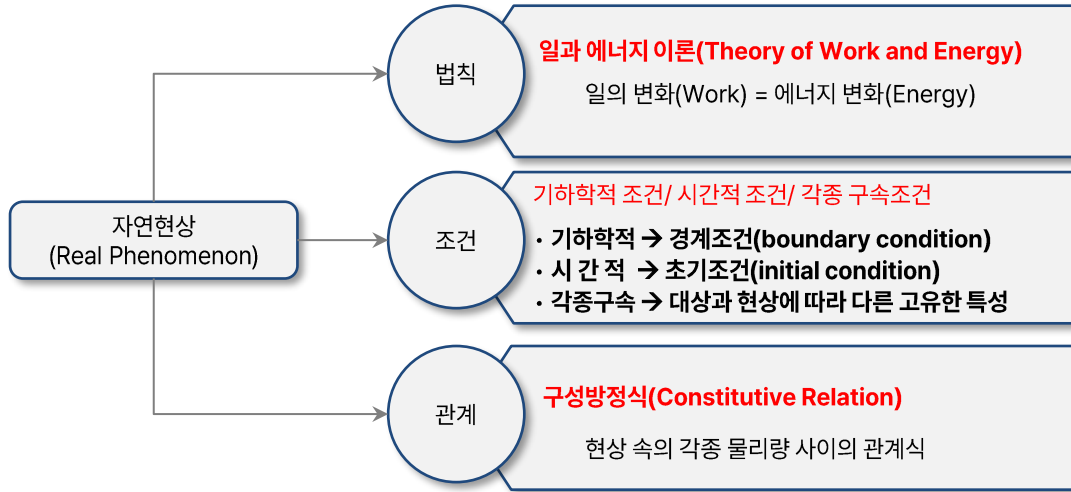
고가의 실험장치

실험의 장기화

구현의 한계성



고전적 해석 기법에 의한 구조해석



$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \dot{q} \text{ in } \Omega \times (0, t] \text{ 지배방정식}$$

$$T = T_0 \text{ at } t = 0 \quad \text{초기조건}$$

$$\left. \begin{aligned} T = \tilde{T} \text{ on } \partial\Omega_D \\ -k \nabla T \cdot \mathbf{n} = \tilde{\gamma} \text{ on } \partial\Omega_N \end{aligned} \right\} \text{ 경계조건}$$

Mathematical Model 로 구성

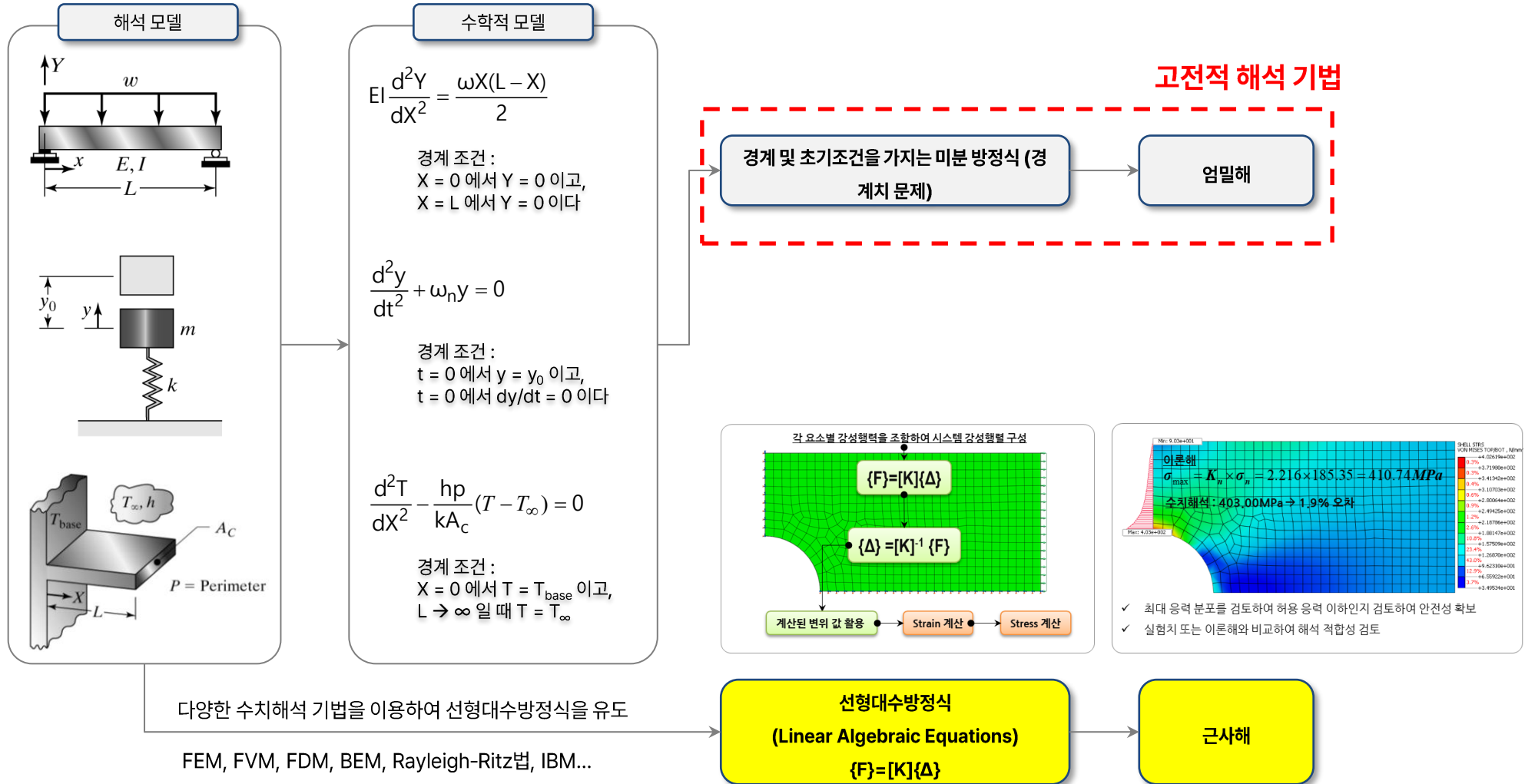
- 경계조건과 초기조건을 갖는 미분 방정식으로 구성
- 경계치 문제

문제 유형	지배방정식, 경계조건, 초기조건	해
	$EI \frac{d^2 Y}{dX^2} = \frac{\omega X(L-X)}{2}$ 경계 조건 : X = 0 에서 Y = 0 이고, X = L 에서 Y = 0 이다	거리 X의 함수에 의한 보(Beam)의 처짐 Y $Y = \frac{\omega}{24EI} (-X^4 + 2LX^3 - L^2 X)$
	$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_n y = 0$ 경계 조건 : t = 0 에서 y = y_0 이고, t = 0 에서 dy/dt = 0 이다	시간의 함수에 의한 질량 m의 위치 $y(t) = y_0 \cos \omega_n t$
	$\frac{d^2 T}{dX^2} - \frac{hp}{kA_c} (T - T_\infty) = 0$ 경계 조건 : X = 0 에서 T = T_base 이고, L → ∞ 일 때 T = T_∞	함수 X에 의한 판에 따른 온도 분포 $T = T_\infty + (T_{base} - T_\infty) e^{-\sqrt{\frac{hp}{kA_c}} X}$

자연현상에 대한 수학적 표현의 해

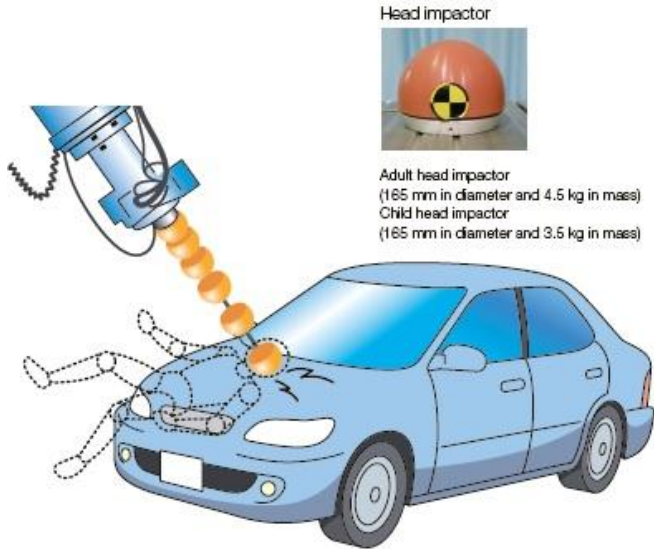
- ✓ 자연현상을 미분방정식으로 표현
- ✓ 형상의 복잡성으로 실무 문제 거의 적용 불가

수치해석 기법에 의한 구조해석



공학적 문제 (Engineering Problem) 해결 방법 비교

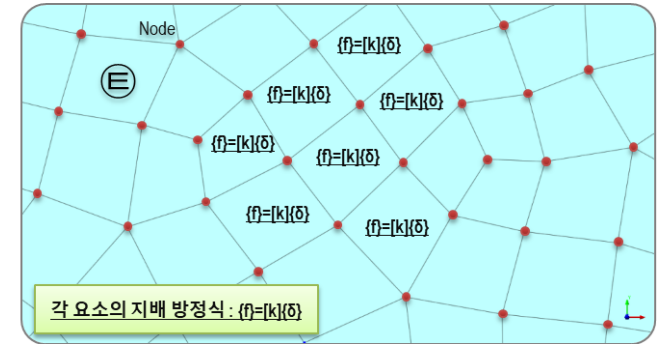
실험적 방법



고전적 방법

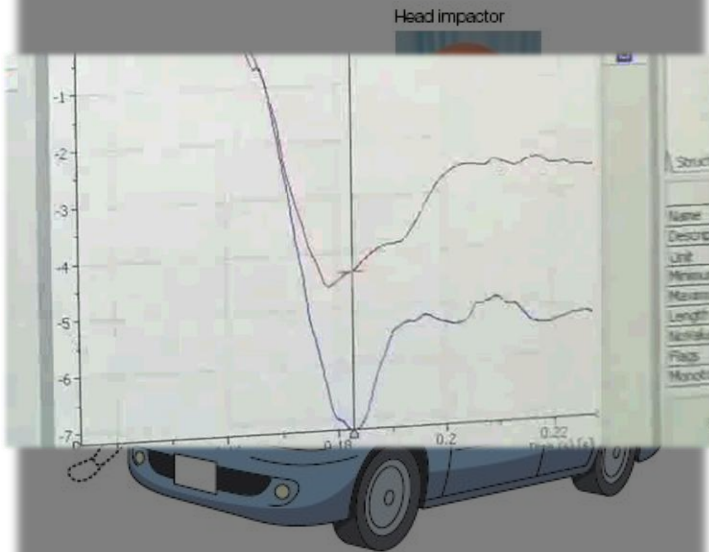
Beam loaded with a concentrated load		Beam with a uniformly distributed load	
<p>fixed at one end</p> $M_b = F \cdot l$ $f = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}$	<p>fixed at one end</p> $M_b = \frac{F \cdot l}{2}$ $f = \frac{F \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I}$		
<p>supported at both ends</p> $M_b = \frac{F \cdot l}{4}$ $f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$	<p>supported at both ends</p> $M_b = \frac{F \cdot l}{8}$ $f = \frac{5 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$		
<p>fixed at both ends</p> $M_b = \frac{F \cdot l}{8}$ $f = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I}$	<p>fixed at both ends</p> $M_b = \frac{F \cdot l}{12}$ $f = \frac{F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$		

수치해석 기법



공학적 문제 (Engineering Problem) 해결 방법 비교

실험적 방법



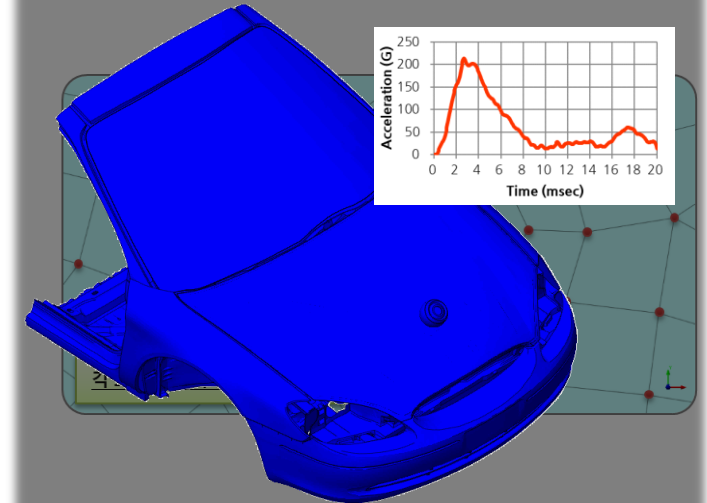
고전적 방법

Beam loaded with a concentrated load	Beam with a uniformly distributed load
fixed at one end	fixed at one end

$$\begin{aligned}
 \frac{w_1(x, y)}{a} = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\bar{x})}{2\bar{R}} \left\{ \frac{Pa}{D} \frac{2\sin(n\pi\bar{x}_0)}{\bar{\mu}_{n1}\bar{\mu}_{n3}} \right. \\
 & \times \{ \bar{\mu}_{n1} \operatorname{csch}(\phi\bar{\mu}_{n3}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n3}\bar{y}) \operatorname{sh}[\phi\bar{\mu}_{n3}(1-\bar{y}_0)] \\
 & - \bar{\mu}_{n3} \operatorname{csch}(\phi\bar{\mu}_{n1}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n1}\bar{y}) \operatorname{sh}[\phi\bar{\mu}_{n1}(1-\bar{y}_0)] \\
 & + H(y-y_0) \{ \bar{\mu}_{n3} \operatorname{sh}[\phi\bar{\mu}_{n1}(\bar{y}-\bar{y}_0)] - \bar{\mu}_{n1} \operatorname{sh}[\phi\bar{\mu}_{n3}(\bar{y}-\bar{y}_0)] \} \} \\
 & + \bar{E}_n \{ \operatorname{ch}(\phi\bar{\mu}_{n1}\bar{y}) [\bar{R} - \pi^2 n^2 (1-\nu)] + \operatorname{ch}(\phi\bar{\mu}_{n3}\bar{y}) [\bar{R} + \pi^2 n^2 (1-\nu)] \\
 & - \operatorname{coth}(\phi\bar{\mu}_{n1}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n1}\bar{y}) [\bar{R} - \pi^2 n^2 (1-\nu)] \\
 & - \operatorname{coth}(\phi\bar{\mu}_{n3}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n3}\bar{y}) [\bar{R} + \pi^2 n^2 (1-\nu)] \\
 & + \bar{F}_n \{ \operatorname{csch}(\phi\bar{\mu}_{n1}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n1}\bar{y}) [\bar{R} - \pi^2 n^2 (1-\nu)] \\
 & + \operatorname{csch}(\phi\bar{\mu}_{n3}) \operatorname{sh}(\phi\bar{\mu}_{n3}\bar{y}) [\bar{R} + \pi^2 n^2 (1-\nu)] \} \}
 \end{aligned} \tag{13}$$

where $\bar{x} = x/a$, $\bar{y} = y/b$, $\bar{x}_0 = x_0/a$, $\bar{y}_0 = y_0/b$, $\phi = b/a$, $\bar{R} = Ra^2$, $\bar{E}_n = E_n/a$, $\bar{F}_n = F_n/a$, $\bar{\mu}_{n1} = \mu_{n1}a = a\sqrt{\alpha_n^2 + R}$
 and $\bar{\mu}_{n3} = \mu_{n3}a = a\sqrt{\alpha_n^2 - R}$.

수치해석 기법



CONTENTS

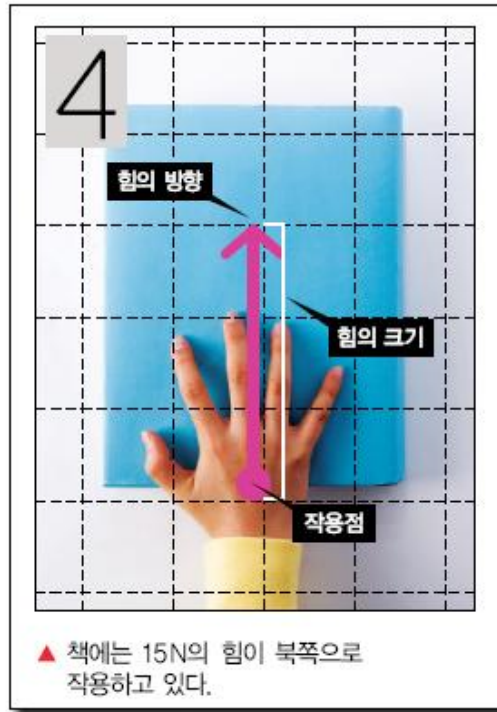
구조 해석 개념 이해

Part 1. 공학적 문제해결 방법 소개

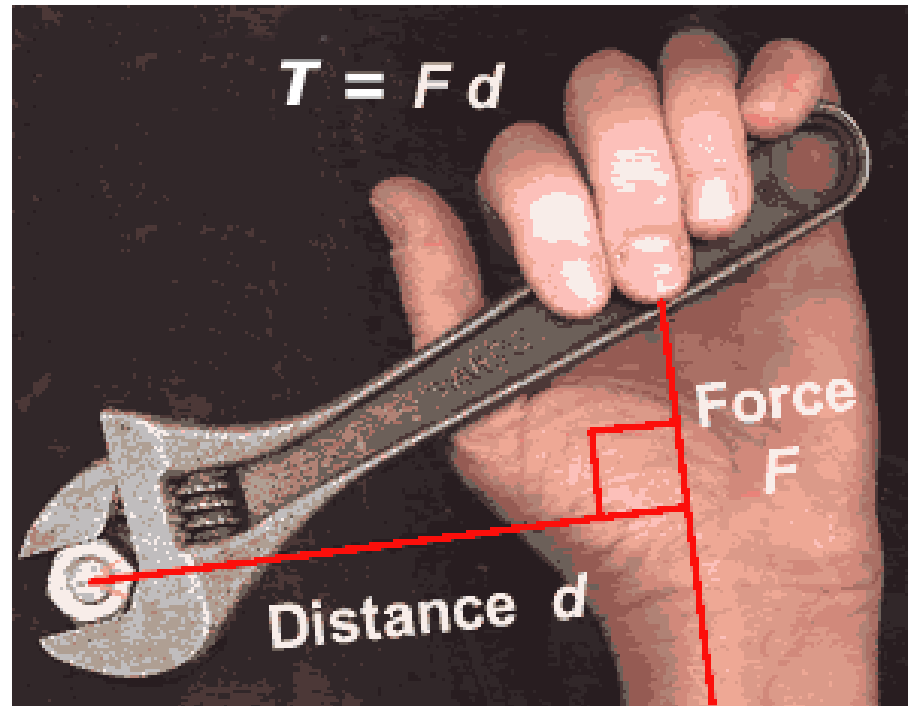
Part 2. 구조해석에 대한 이해

Part 3. 유한요소해석에 대한 이해

힘과 모멘트



<FORCE>



<MOMENT>

힘과 모멘트



힘의 작용

물체의 운동상태를 변경

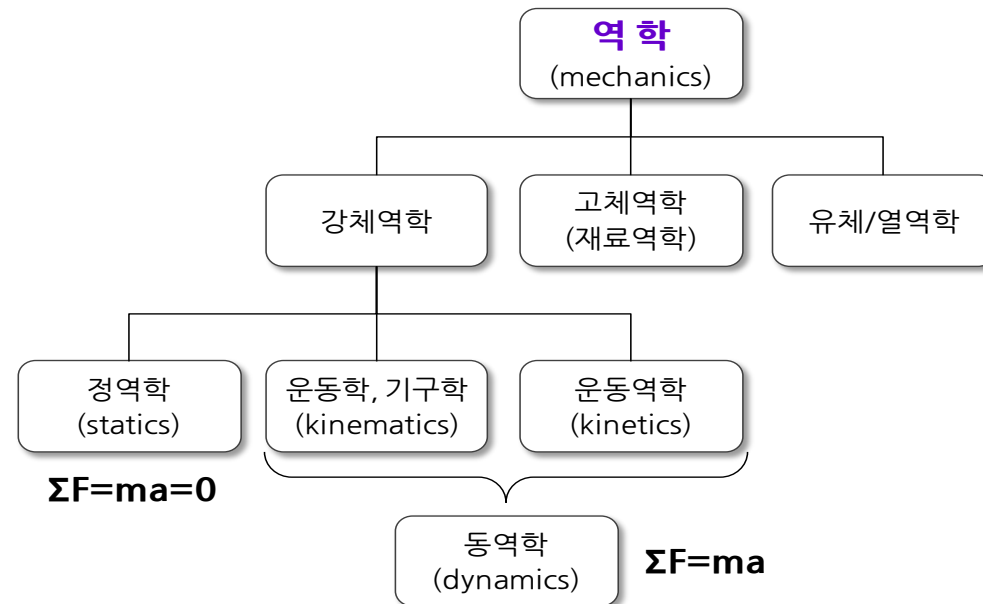


물체의 변형을 유발



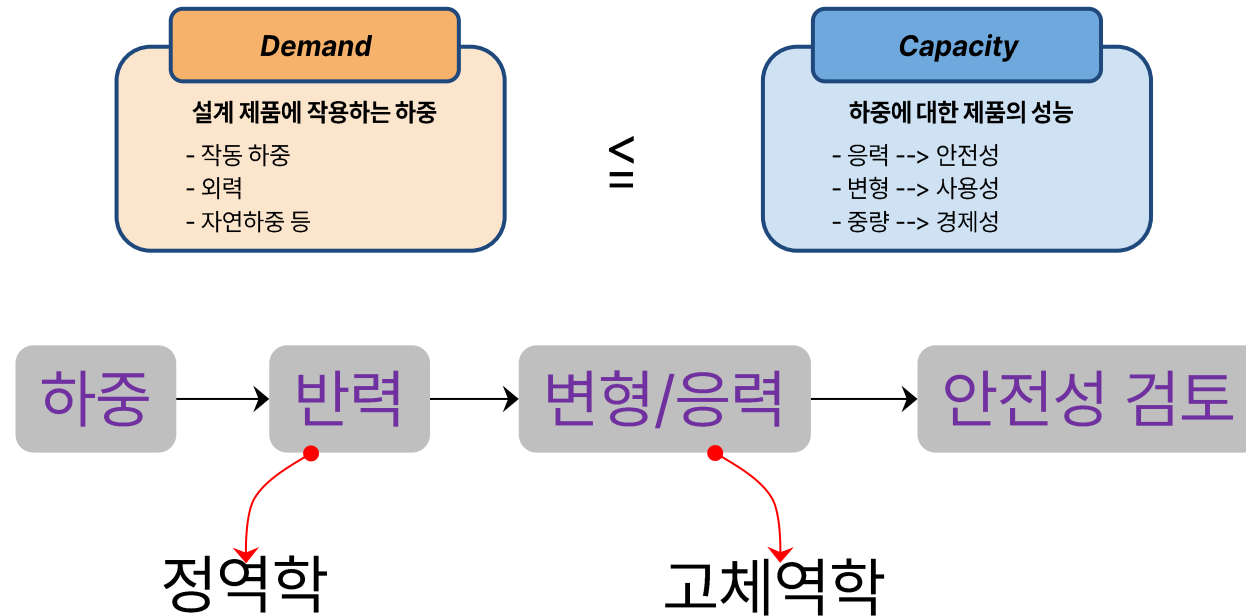
Mechanics

- 외력을 받고 있는 물체의 정지 또는 운동 상태를 설명하고 예측하는 과학
- 강체역학 : 정지상태의 물체에 작용하는 힘과 그 평형을 다루는 정역학과 움직이는 물체를 다루는 동역학으로 구분 (물체 : 강체)
- 고체역학 : 물체의 변형을 고려하여 외력에 대한 저항능력을 평가 (물체 : 변형체)
- 유체역학 : 유체의 운동에 대해서 연구하는 학문



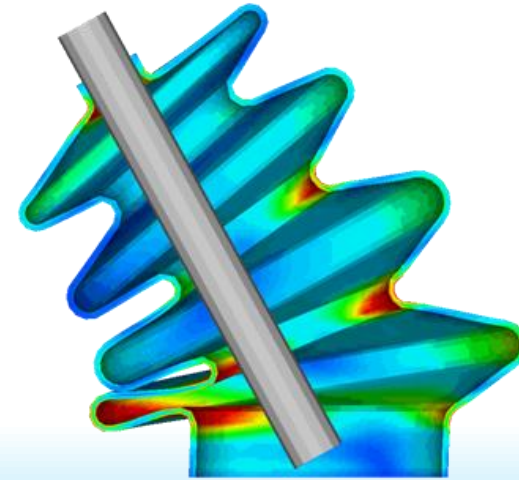
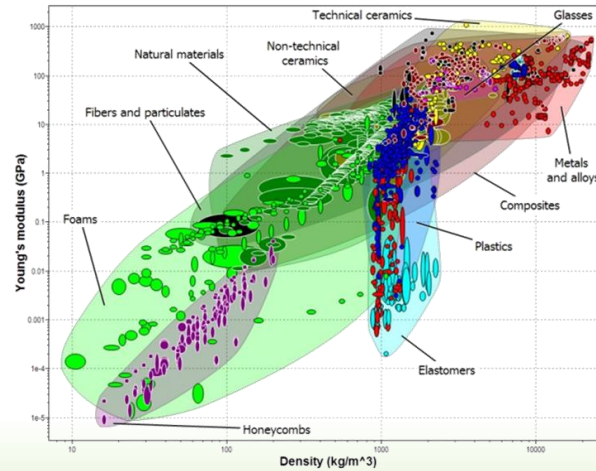
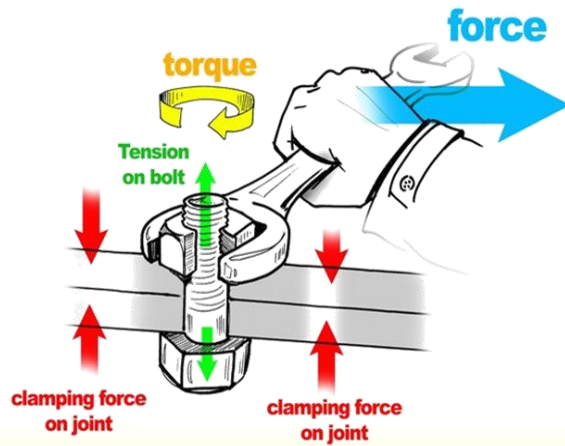
구조해석 (Structural Analysis)

- 구조체에 하중이 가해지면 그 구조체에는 변형이 일어나게 되며 이 변형에 따라 이 구조에 가해진 외력과 평형을 이루는 내부 응력이 발생
- 외력에 대한 구조체의 변형과 응력분포를 구하는 것을 일반적으로 구조해석이라 함



고체역학

평형 상태의 힘이 고체(변형이 가능한 재료)에 가해졌을 때 그 재료의 변형에 대한 학문



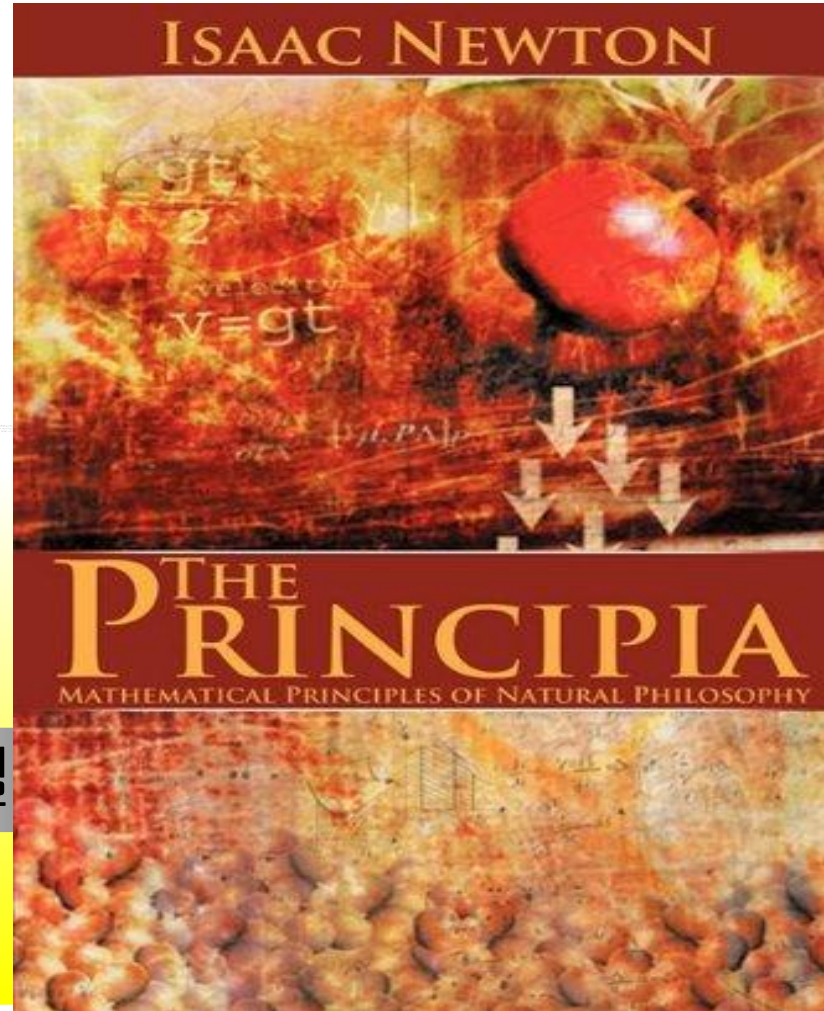
힘

재료

변형

Newton's Law

제1법칙
관성의 법칙

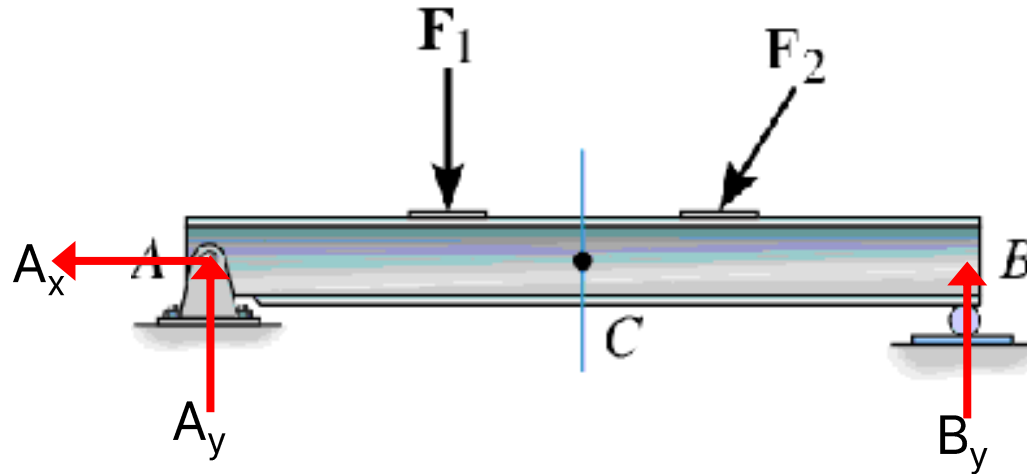


제3법칙
작용과 반작용의 법칙



힘의 평형 조건

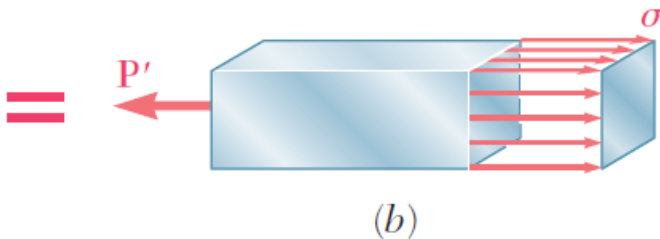
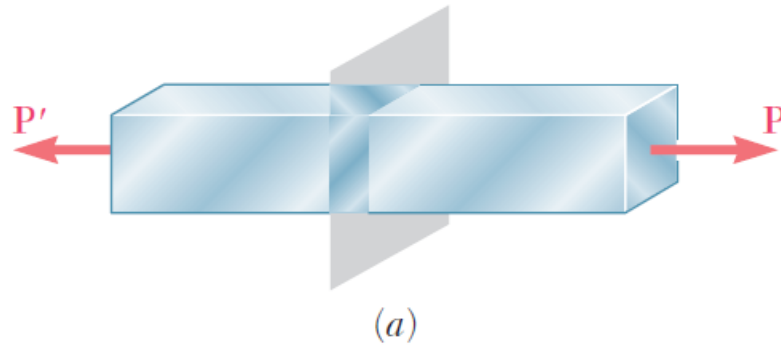
뉴턴의 법칙



$$\Sigma \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \begin{cases} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \end{cases}$$

$$\Sigma \vec{M}_a = \vec{0} \rightarrow \Sigma M_{A,z} = 0$$

내력과 응력



내력

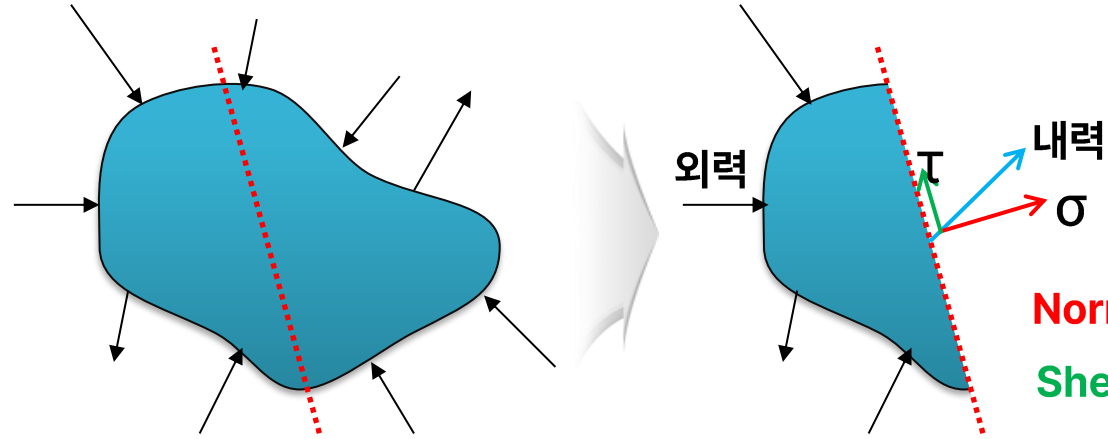
- 외력에 대칭된 말
- 재료에 힘이 작용할 때 그 힘에 평형 되기 위해 재료 내에 그 힘과 반대 방향으로 크기가 같은 저항력이 발생
- 이 저항력을 내력이라고 함

응력

- 단위 면적(1cm²)에 대한 내력의 크기를 응력(stress)이라고 함.

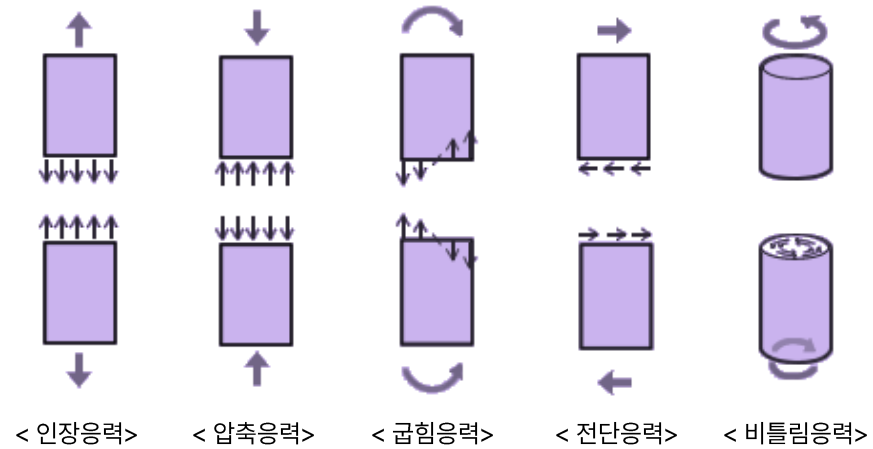
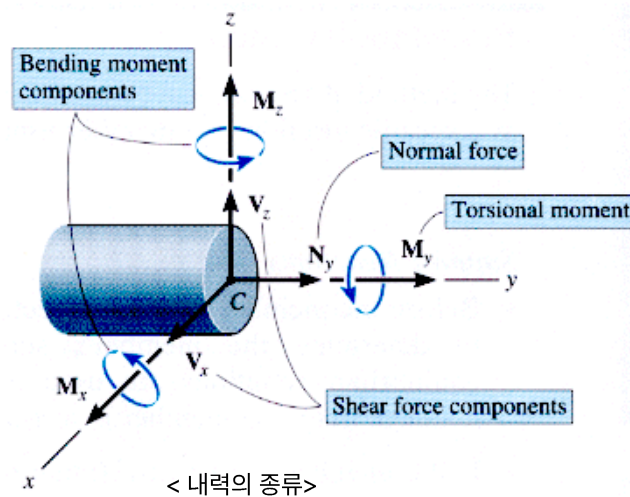
$$\text{응력} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F}{A}$$

응력의 종류



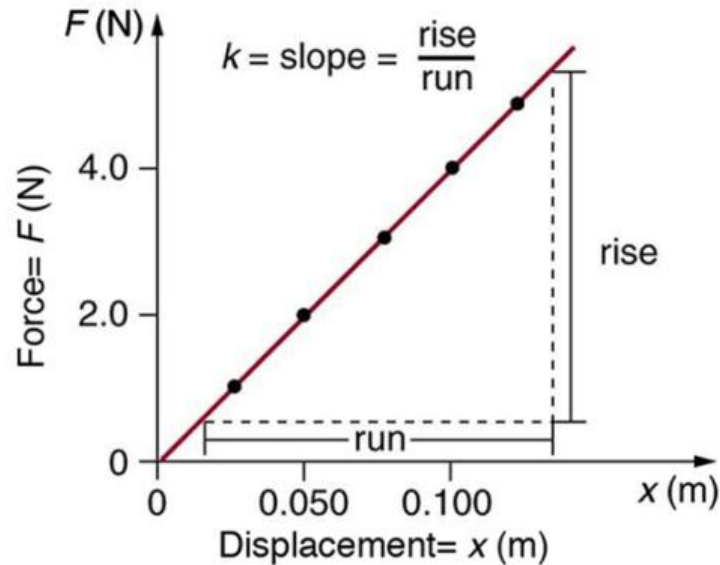
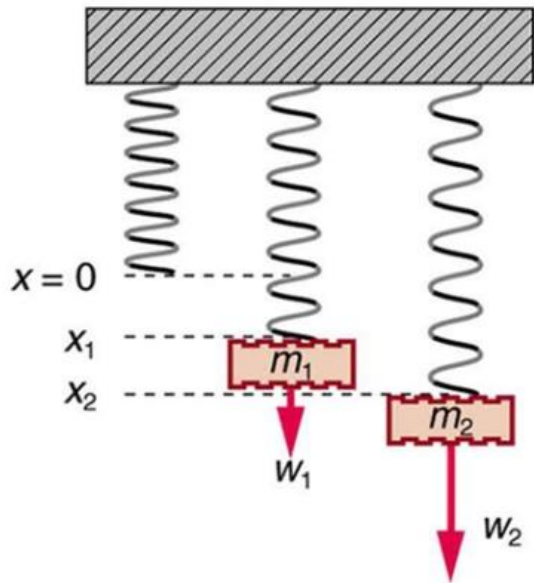
Normal Stress, $\sigma = F/A$

Shear Stress, $\tau = F/A$



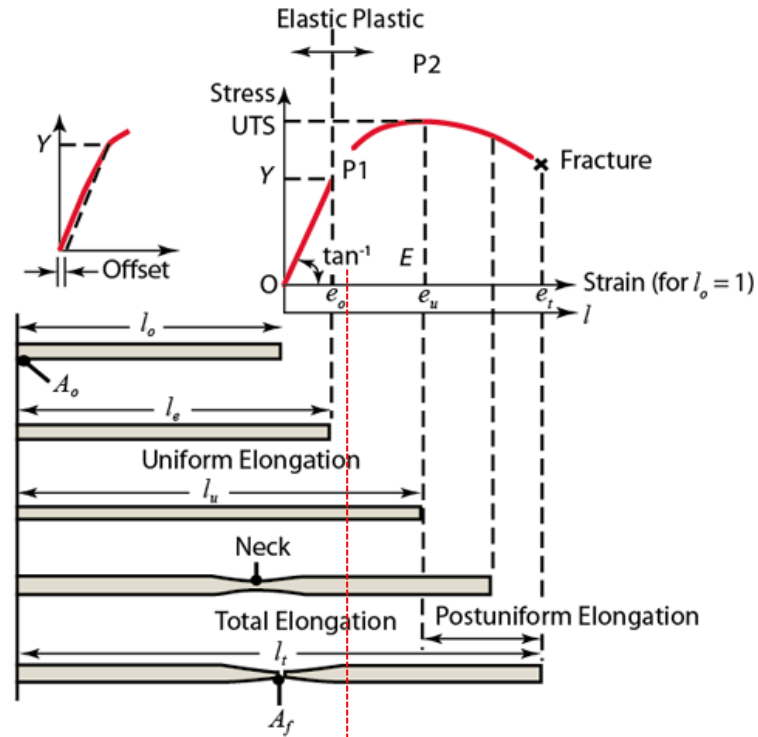
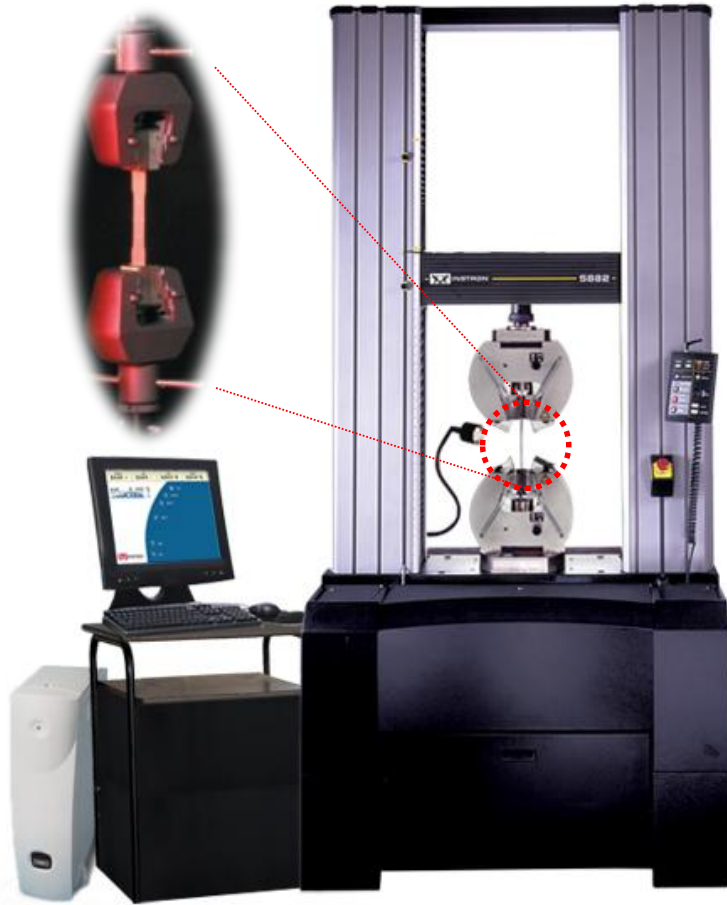
Robert Hooke - 힘과 변형의 관계

“탄성물체에서는 가한 힘과 물체에 생긴 변형과는 비례”



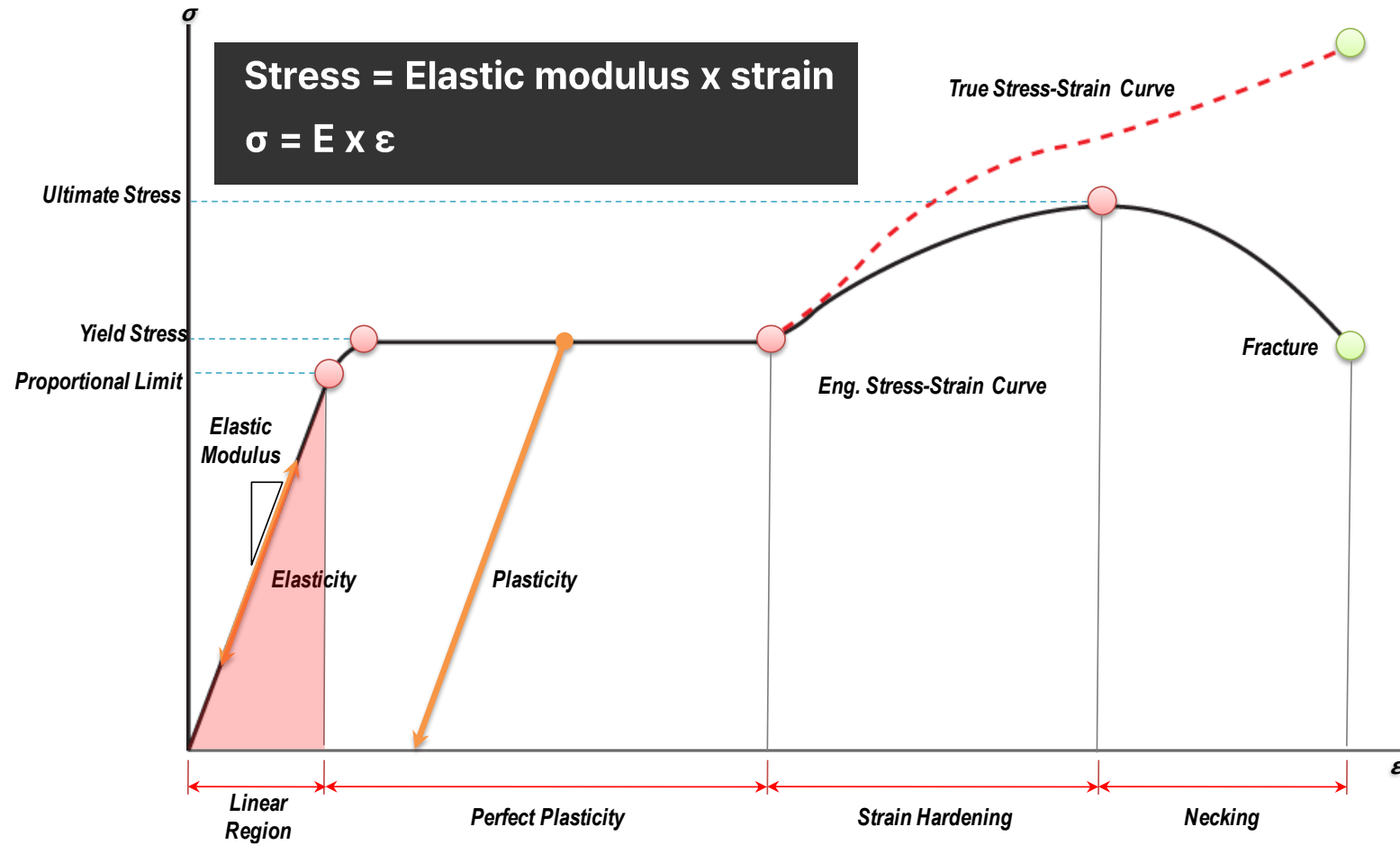
m (kg)	w (N)	x (m)
0.000	0.00	0.000
0.100	0.98	0.025
0.200	1.96	0.050
0.300	2.94	0.076
0.400	3.92	0.099
0.500	4.90	0.127

Tensile Test

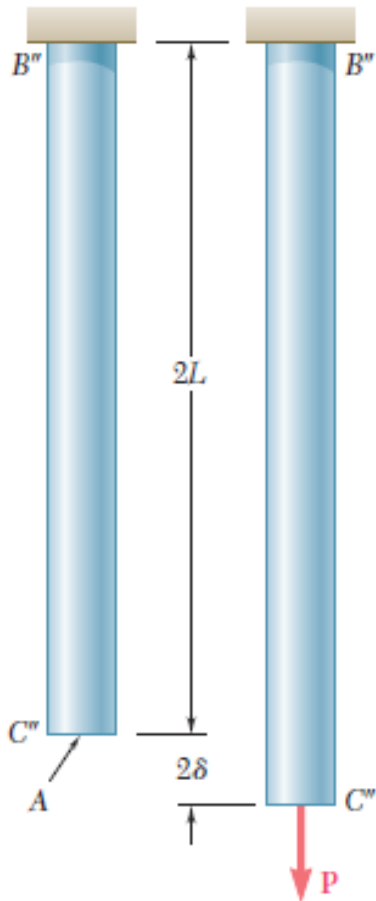


변형률(strain), $\epsilon = \text{늘어난 길이} / \text{원래 길이}$

Hooke's Law



힘과 변형의 관계



Hooke's Law에 의해

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Stress

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Strain

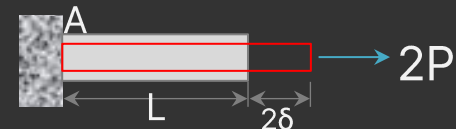
$$\varepsilon = \frac{2\delta}{2L}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{E\delta}{L}$$

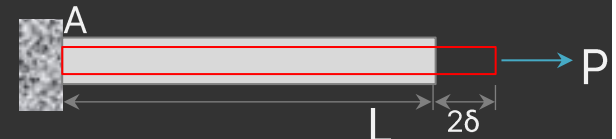
$$P = \frac{EA}{L} \delta$$

힘과 변형의 관계식

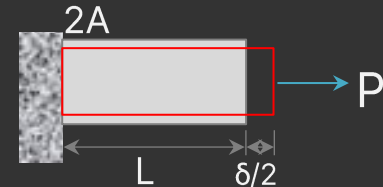
$$P = \frac{EA}{L} \delta \quad F = K \times \Delta$$



<변형량은 하중 크기에 비례>



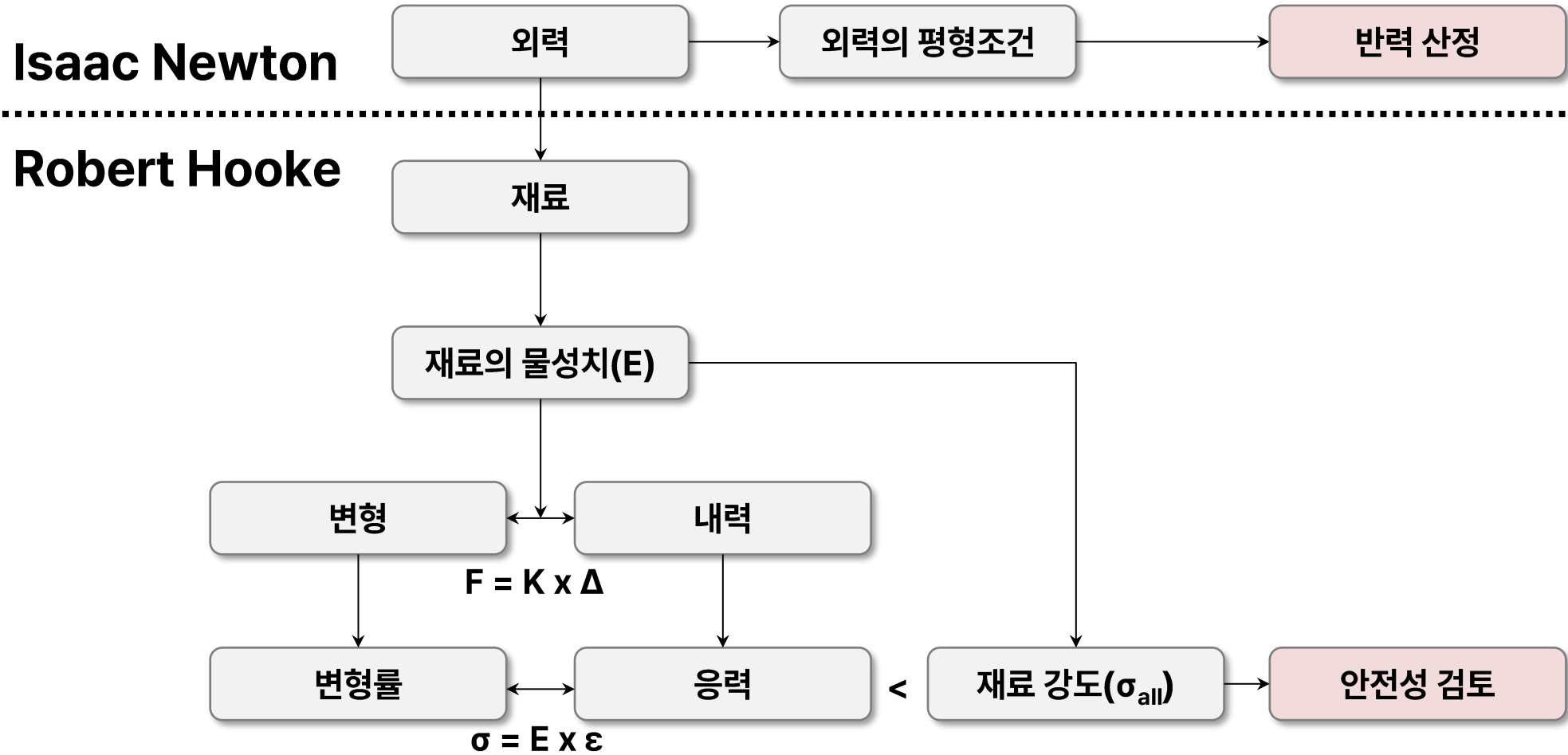
<변형량은 길이에 비례>



<변형량은 단면적에 반비례>

- 힘과 변형의 관계는
재료, 단면 특성, 길이에 비례하고
이를 강성(stiffness)이라 정의

Summary



CONTENTS

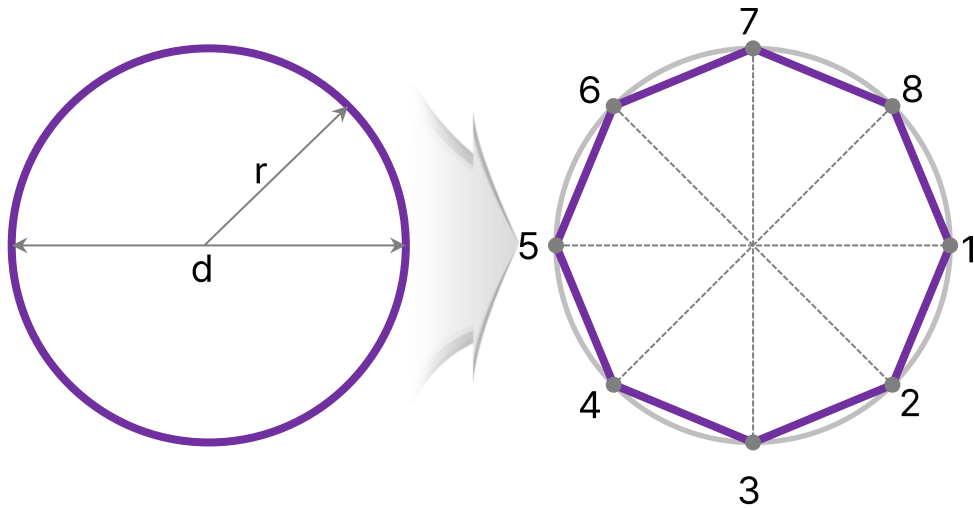
구조 해석 개념 이해

Part 1. 공학적 문제해결 방법 소개

Part 2. 구조해석에 대한 이해

Part 3. 유한요소해석에 대한 이해

유한요소법 개요



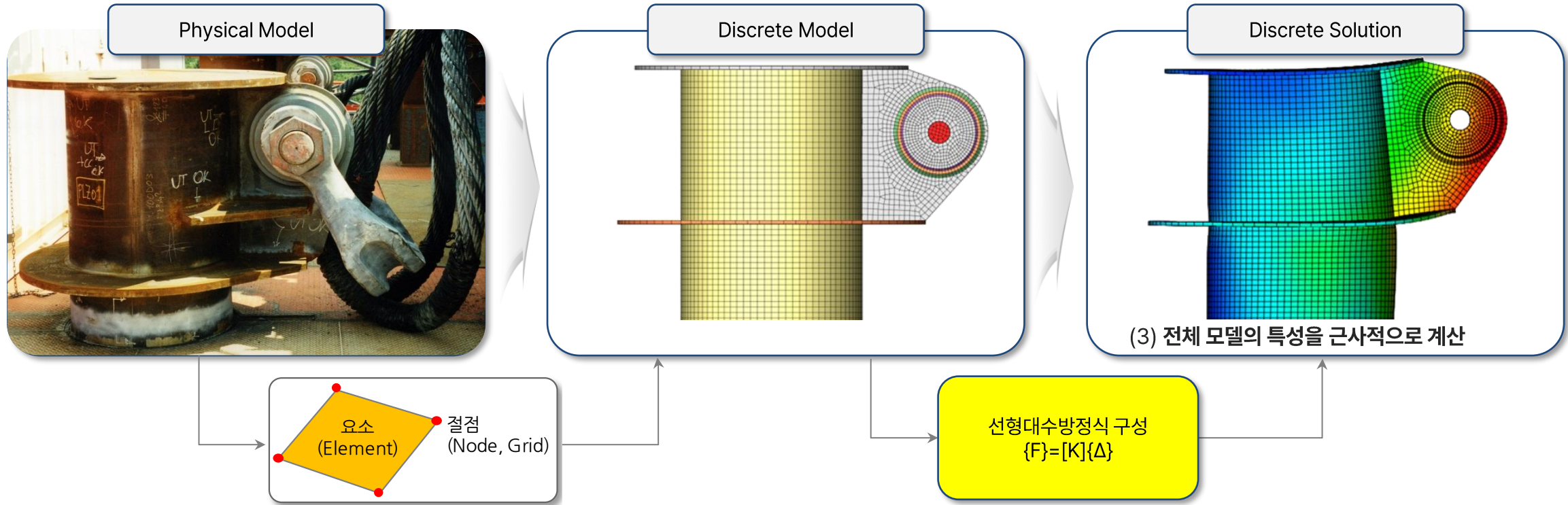
<반지름 r 인 원주 계산>
 ✓ 이론해 : $2\pi r$

<등간격의 유한개의 직선으로 분할>
 ✓ 유한요소법에 의한 수치해석법

요소 개수	유한요소법	오차율 (3.141592653589793)
4	2.828427124746190	9.96837%
8	3.061467458920718	2.55046%
16	3.121445152258052	0.64131%
32	3.136548490545939	0.16056%
64	3.140331156954753	0.04015%
128	3.141277250932773	0.01004%
256	3.141513801144301	0.00251%

* 유한요소법은 원과 같은 연속체 구조물을 유한개의 직선(이산화 요소)으로 분할하여 근사해를 구하는 방법과 유사합니다.

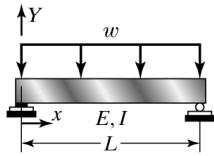
유한요소법 개요



(1) 전체 모델을 우리가 조작할 수 있는 유한개의 요소단위로 분할

(2) 개별 요소단위의 특성을 계산한 후, 전체 요소의 특성을 모두 조합

강성 행렬의 이해



$$EI \frac{d^2Y}{dX^2} = \frac{\omega X(L-X)}{2}$$

$$[K] \{\Delta\} = [F]$$

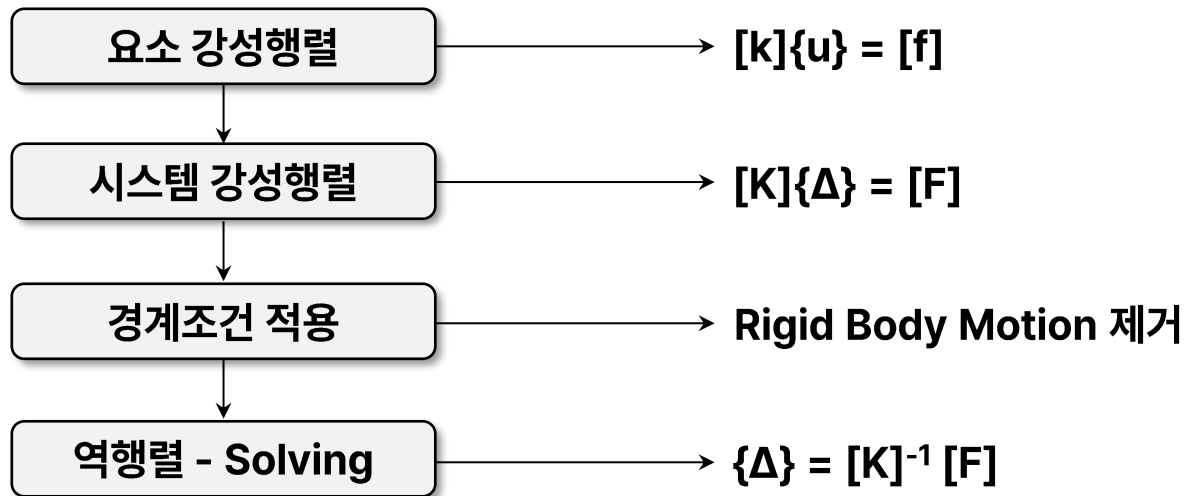
해석종류	특성 (Characteristic)	거동 (Behavior)	작용 (Action)
응력해석	강성 (Stiffness)	변위 (Displacement)	힘 (Force)
	변형에 대한 저항 능력	변형	변형을 유발하는 작용
온도해석	열전도 (Conduction)	온도 (Temperature)	열유속 (Heat Flux)

대상 구조물의
특성 정의

미지수/자유도
(계산 대상)

유한요소법 이론

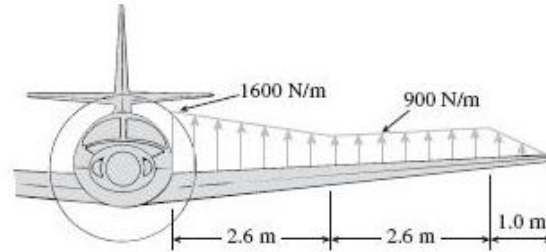
- 전체 모델을 우리가 조작할 수 있는 **유한개의 요소단위로 분할**하고,
- **개별 요소 단위의 특성을 계산**한 후, **전체 요소의 특성을 모두 조합**하여,
- **전체 모델의 특성을 근사적으로 계산**하는 방법
- **근사해법 (Approximation Method) → 오차(Error) 존재**



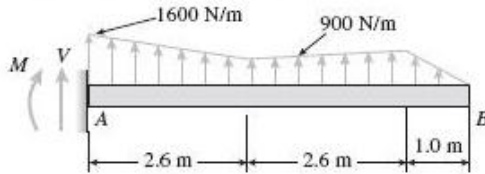
유한요소법 이해

Problem 4.3-10 Under cruising conditions the distributed load acting on the wing of a small airplane has the idealized variation shown in the figure.

Calculate the shear force V and bending moment M at the inboard end of the wing.



Solution 4.3-10 Airplane wing



SHEAR FORCE

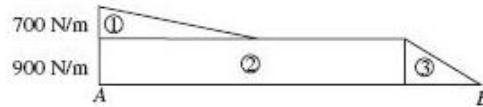
$$\sum F_{VERT} = 0 \quad \uparrow + \quad \downarrow -$$

$$V + \frac{1}{2}(700 \text{ N/m})(2.6 \text{ m}) + (900 \text{ N/m})(5.2 \text{ m}) + \frac{1}{2}(900 \text{ N/m})(1.0 \text{ m}) = 0$$

$$V = -6040 \text{ N} = -6.04 \text{ kN} \quad \leftarrow$$

(Minus means the shear force acts opposite to the direction shown in the figure.)

LOADING (IN THREE PARTS)



BENDING MOMENT

$$\sum M_A = 0 \quad \curvearrowright + \quad \curvearrowleft -$$

$$-M + \frac{1}{2}(700 \text{ N/m})(2.6 \text{ m})\left(\frac{2.6 \text{ m}}{3}\right) + (900 \text{ N/m})(5.2 \text{ m})(2.6 \text{ m}) + \frac{1}{2}(900 \text{ N/m})(1.0 \text{ m})\left(5.2 \text{ m} + \frac{1.0 \text{ m}}{3}\right) = 0$$

$$M = 788.67 \text{ N} \cdot \text{m} + 12,168 \text{ N} \cdot \text{m} + 2490 \text{ N} \cdot \text{m} = 15,450 \text{ N} \cdot \text{m} = 15.45 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \leftarrow$$

For the shown truss determine:

- the reactions at supports D and G,
- the force in each member using the method of joints and state if the members are in tension or in compression,
- the force in member BG using the method of sections.

Solution:

(a) The reactions at supports D and G

- There are 3 components of reactions at supports D and G (3 unknowns; D_x , D_y , and G_y)
- To determine the horizontal component of the reaction at hinged support D (D_x)

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \quad (\text{there is no horizontal force except } D_x) \implies D_x = 0$$

- To determine the vertical component of the reaction at hinged support D (D_y)

$$\begin{aligned} \curvearrowright \sum M_G = 0 \\ -12 \times 4.5 - 18 \times 2.25 - D_y \times 2.25 = 0 \end{aligned}$$

$$\implies D_y = -42 \text{ kN} \uparrow \quad (\text{The negative sign means that } D_y \text{ is}$$

$$\text{opposite to the assumed direction}) \implies D_y = 42 \text{ kN} \downarrow$$

- To determine the vertical component of the reaction at roller support G (G_y)

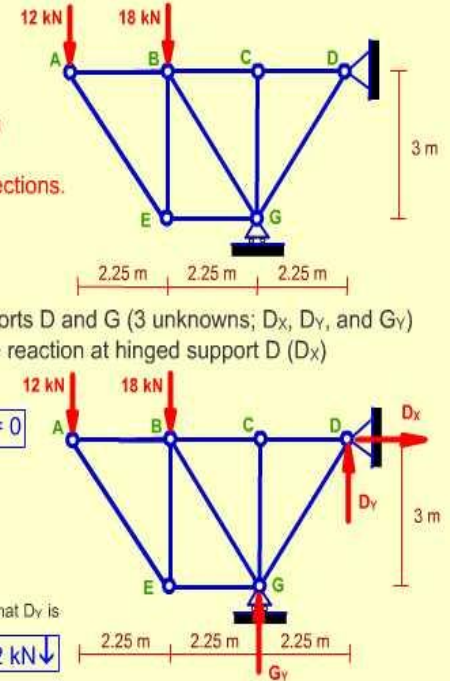
$$\curvearrowright \sum M_D = 0$$

$$-12 \times 6.75 - 18 \times 4.5 + G_y \times 2.25 = 0 \implies G_y = +72 \text{ kN} \uparrow \implies G_y = 72 \text{ kN} \uparrow$$

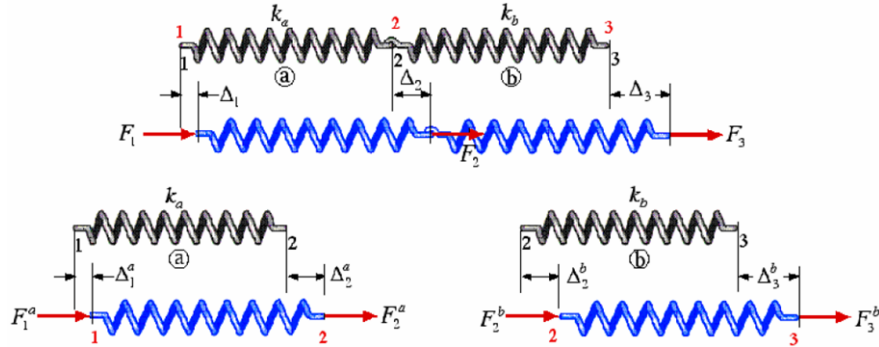
- Check:

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$G_y + D_y - 12 - 18 = +72 + (-42) - 12 - 18 = 0 \quad \text{OK}$$



유한요소법 이해



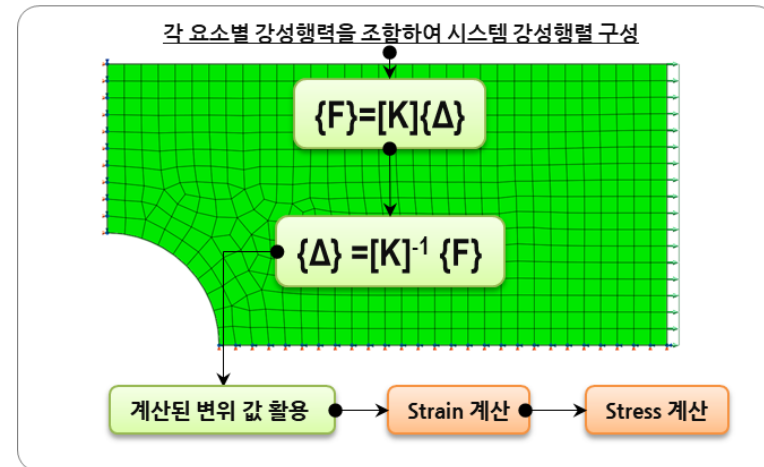
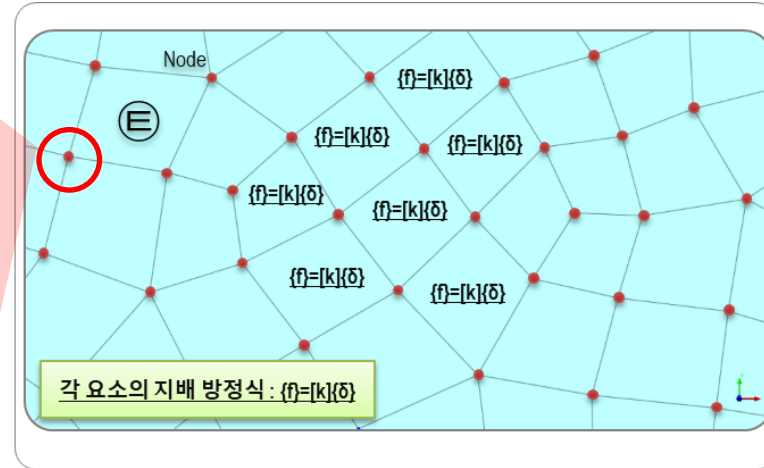
$$\begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^{(1)}_1 \\ u^{(1)}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^{(1)}_1 \\ f^{(1)}_2 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^{(2)}_2 \\ u^{(2)}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^{(2)}_2 \\ f^{(2)}_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^{(1)}_1 \\ f^{(1)}_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f^{(2)}_2 \\ f^{(2)}_3 \end{Bmatrix}$$

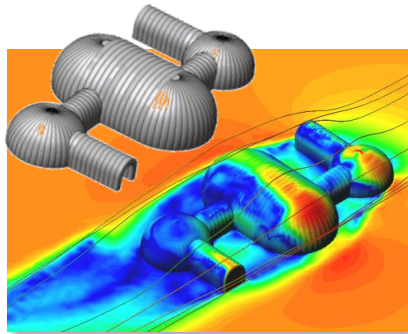
$$\begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1+K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$



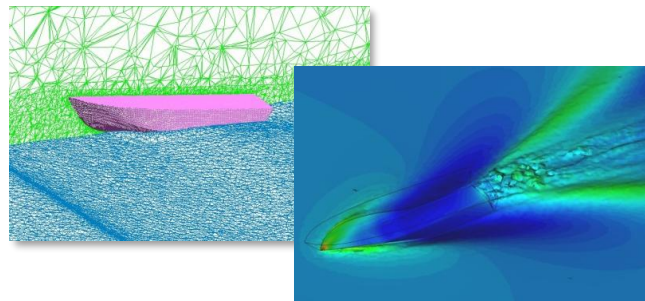
유한요소법 장/단점

1. 장점

- ✓ 불규칙적인 임의 형상의 구조물도 쉽게 모델링 가능 (고전해법의 단점)
- ✓ 여러 가지 조건 자유롭게 적용이 가능 (실험의 단점)
- ✓ 각 요소에 대해 서로 다른 방정식으로 풀기 때문에 재료에 대한 제한이 없음 (고전해법의 단점)
- ✓ 경계조건의 종류와 개수에 제한이 없음 (고전해법의 단점)
- ✓ 특정 부위에 대한 상세 검토가 가능 (실험의 단점)
- ✓ 모델 변경이 쉽고, 간단하게 변경 가능 (실험, 고전해법의 단점)



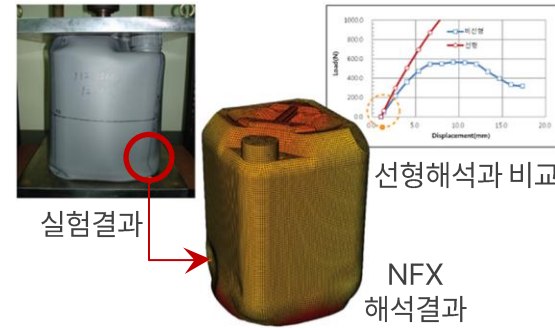
건물 풍동 난류 해석



선박 안정성 검토

2. 단점

- ✓ 근사해를 구하는 방식으로 해석 결과의 오차 발생
- ✓ 해석 결과에 대한 신뢰성 검증이 필요
- ✓ 유한요소법은 많은 수의 대수 방정식을 풀어야 하므로 어렵고 사용하기에 비 실용적
→ 컴퓨터 발전으로 문제 해결



폴리에틸렌 용기의 좌굴해석 (기하 비선형)

공학의 모든 분야에서 활용 가능하나 해석 결과의 평가는 많은 경험/지식이 필요

CAE 발전 과정

1900

변분 방정식 및 수학기론

1950

유한요소법 기초 수식화

1960

유한요소법 기본 정립

1970

유한요소법 구조해석 확장 연구

1980

유한요소법 상업용 프로그램 시작

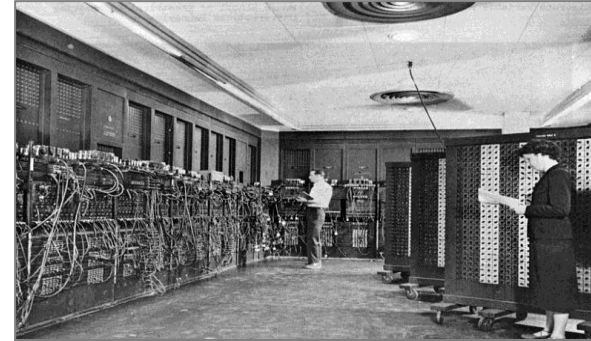
1990

효율적인 요소 개발 및
해석 기법 개발

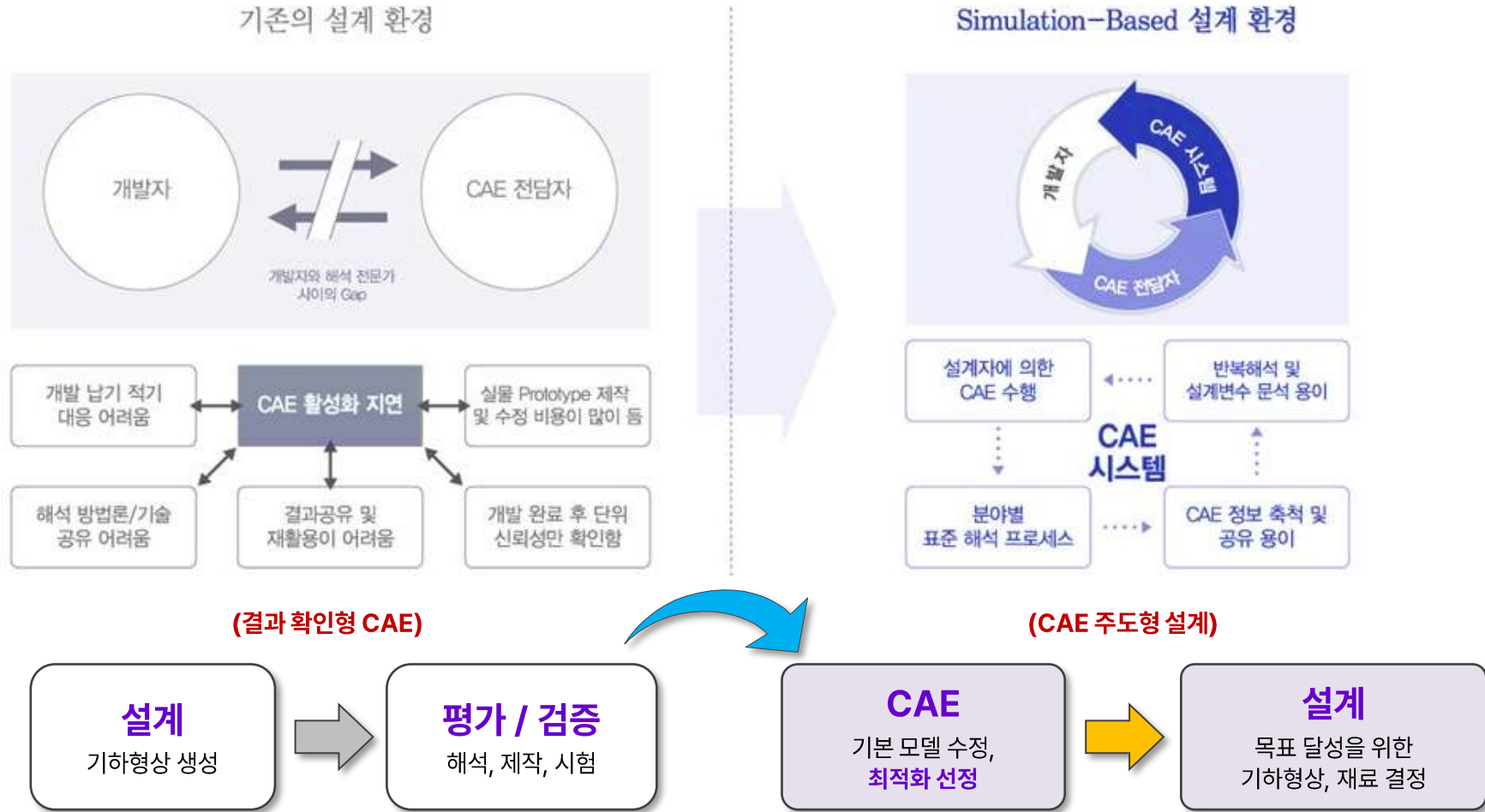
2000

산업계에 본격적으로 적용 시작

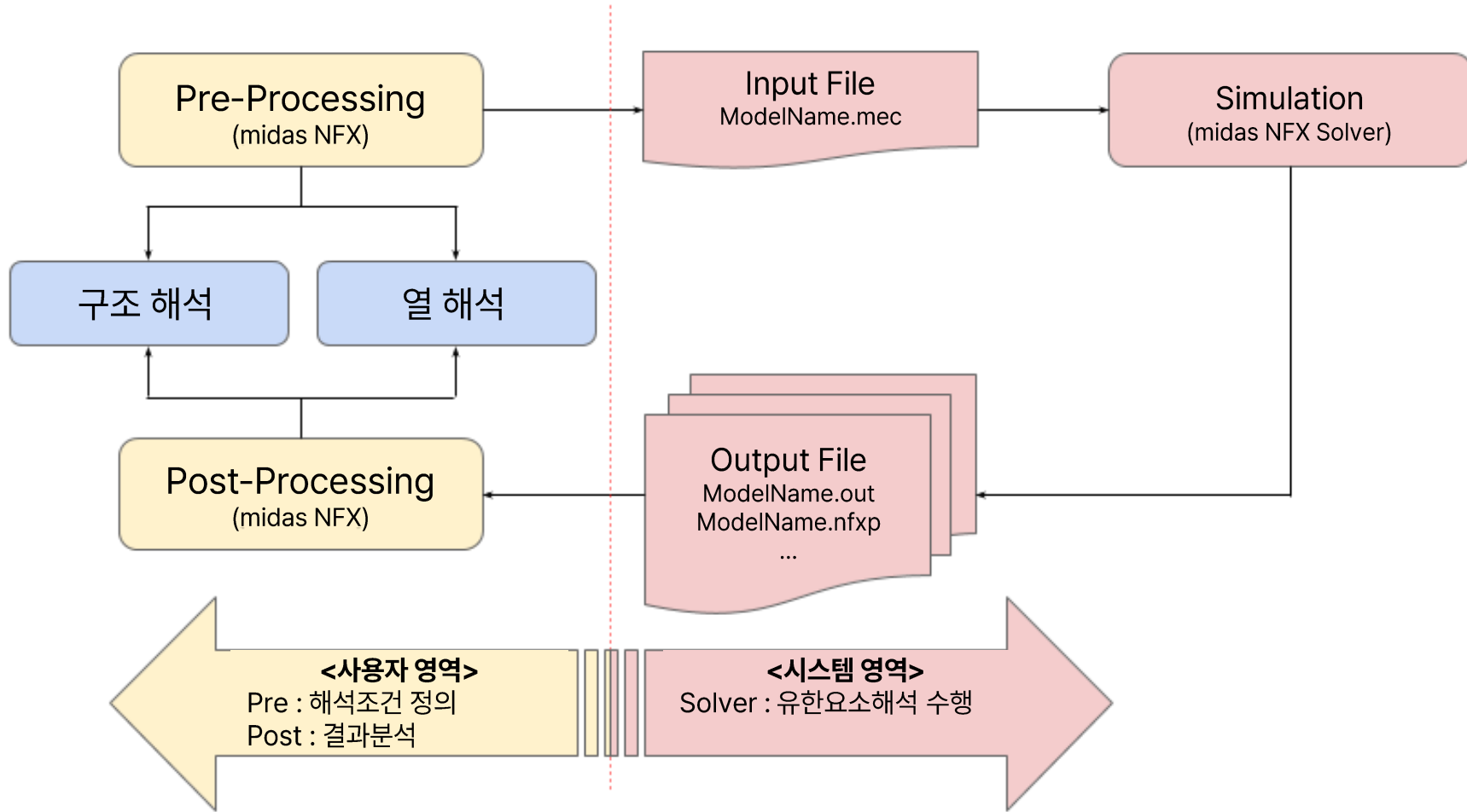
효율성/편의성/정확성 향상
제품 설계에 주도적인 역할



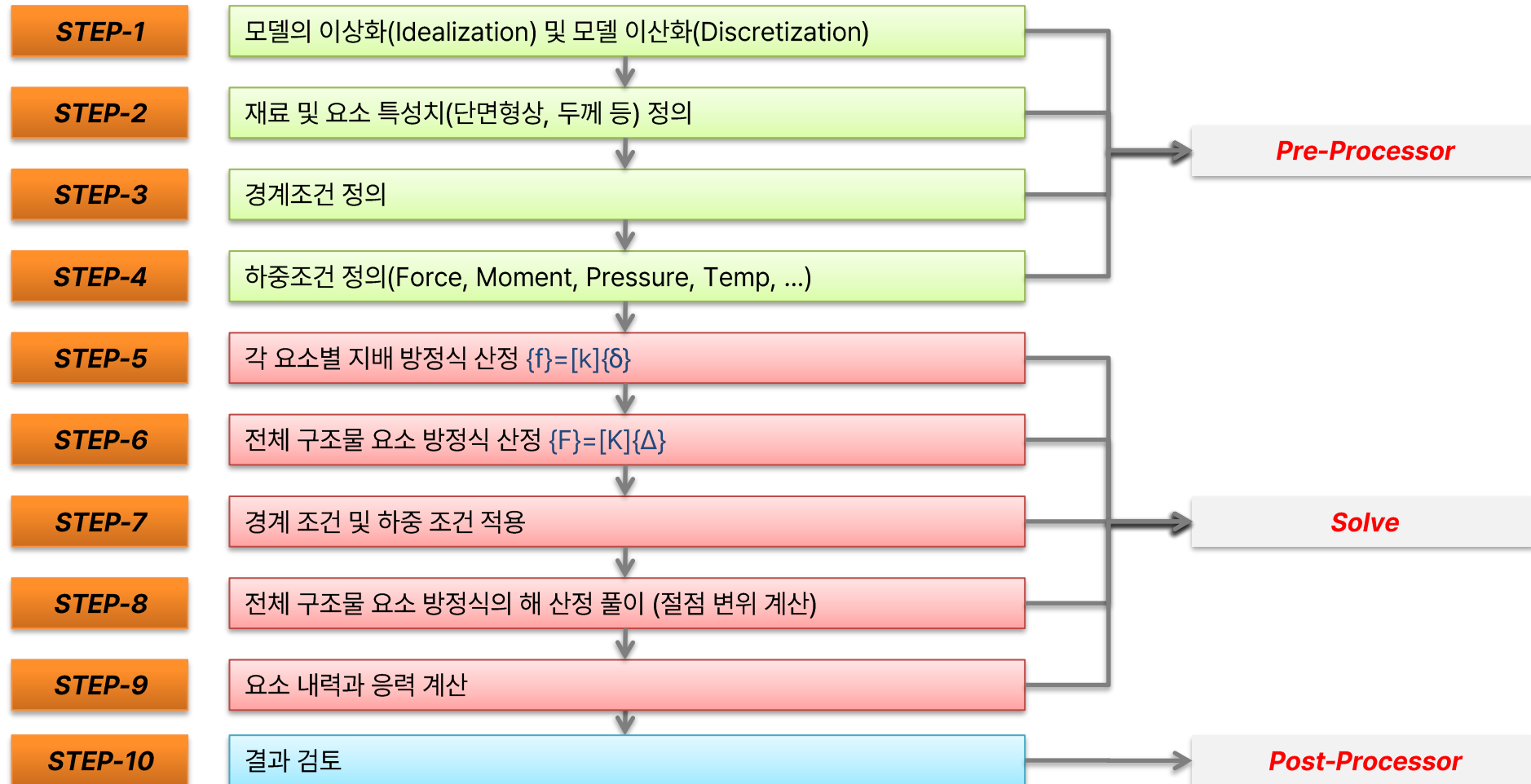
Simulation-Based 설계환경



CAE S/W 일반적인 구성

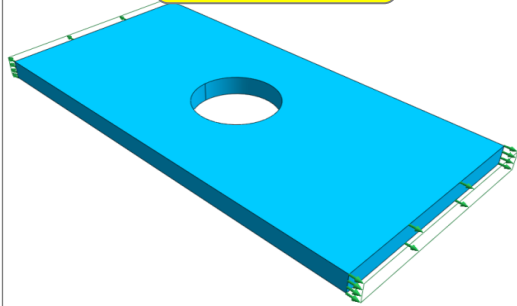


CAE S/W 일반적인 해석절차



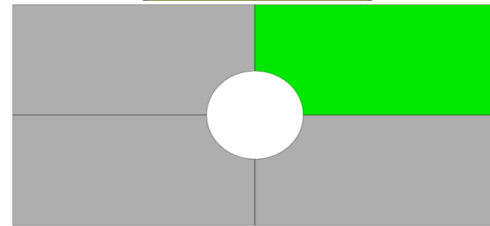
해석 프로세스 (Pre-Process)

㉠ 문제정의



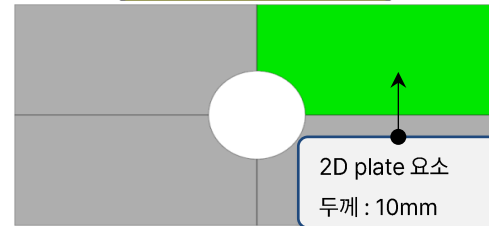
- ✓ 지름 40mm 홀을 가진 10mm plate
- ✓ Plate 양 끝단에 111.21MPa 작용하여 인장
- ✓ Plate의 재료는 AISI304 재질로 구성되어 있음

㉡ 모델이상화



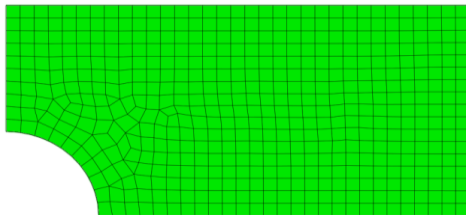
- ✓ 얇은 판재 모델이므로 2D 요소 사용
- ✓ 형상과 하중이 대칭이므로 1/4 대칭 모델 활용
- ✓ 녹색 영역만 유한요소로 모델링 하여 해석 수행

㉢ 재료 및 요소 정의



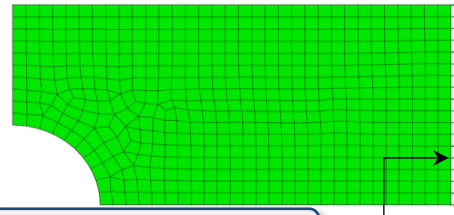
Material : AISI304
 탄성계수 : 197,000MPa
 포아송비 : 0.27
 질량밀도 : 7.955e-6 Kg/mm³

㉣ 요소망 생성



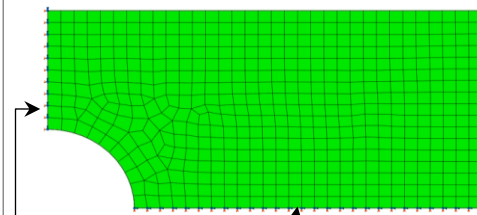
- ✓ 요소 형상 정의 (Tri + Quad 모델 적용)
- ✓ 요소 크기 정의

㉤ 하중 입력



Pressure Load 적용
 하중 : 1,112.1 N/mm

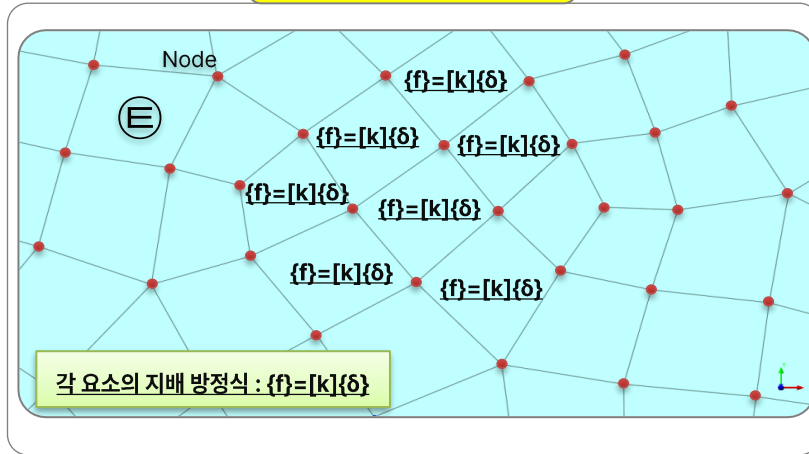
㉥ 경계조건 입력



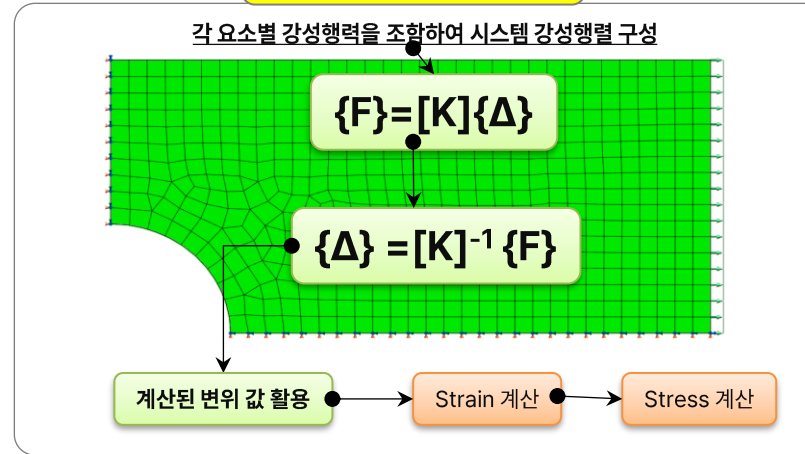
경계조건 입력
 1/4 대칭 경계 조건 입력

해석 프로세스 (Solve/Post-Process)

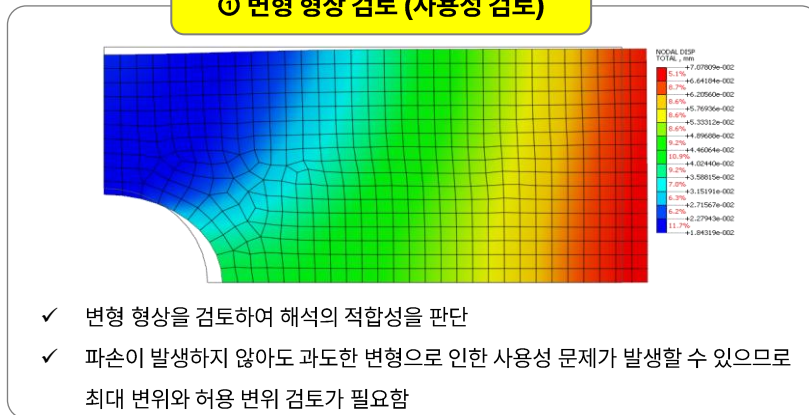
① 요소 강성행렬 구성



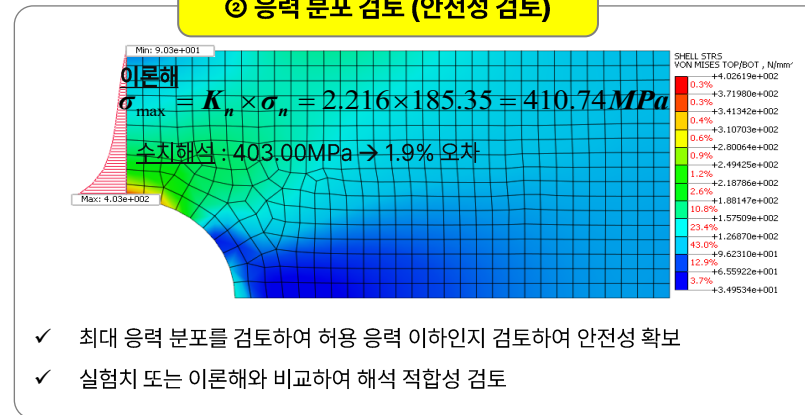
② 시스템 강성행렬 구성



③ 변형 형상 검토 (사용성 검토)



④ 응력 분포 검토 (안전성 검토)

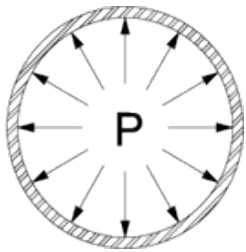


전처리 과정 주요 사항 - 하중



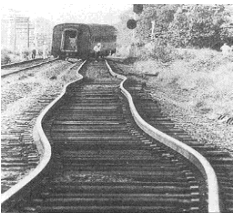
■ 구조물의 자중

- 자중은 구조물의 무게 및 부품의 무게를 나타냄
- Dead Load : 구조물의 무게 및 부품의 무게등
기타 영구적으로 장착되는 요소재의 무게
- Live Load : 유체의 무게, 사람 하중 등 일시적으로 작용되는 무게



■ 압력 (Pressure) 하중

- 배관이나 압력 용기 내외부에 지속응력을 발생시키는 주요 요소
- 수압이나 토압, 진공하중 등도 압력하중으로 표현됨



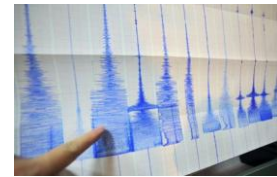
■ 온도 (Temperature) 하중

- 온도변화에 따른 구조물의 팽창, 수축을 하중으로 표현
- 온도변화에 따른 온도차를 이용하여 하중으로 적용함
- 열이 발생하는 전자장비 및 챔버 등에 주요하게 고려됨



■ 바람 (Wind)

- 수평방향의 일정한 힘에 의해 변형 유발
- 옥외에 설치되는 구조물은 일반적으로 예상되는 최대 풍속에 견딜 수 있도록 설계



■ 지진 (Seismic)

- 지반의 흔들림에 의해 구조물의 변형을 유발하는 하중
- 건축물, 교량에 일반적으로 적용되는 하중 인명 피해가 예상되는 구조물에 필수적으로 적용



■ 진동 (Vibration), 충격 (Impact)

- 펌프, 압축기 또는 터빈과 같은 회전기로부터 전달되는 기계적 진동
- 안전밸브 또는 방출밸브의 급속한 개방으로 인한 충격진동
- 장비의 가감속에 의한 충격진동 등

사전 질문 사항

- 해석 대상에 작용하고 있는 **하중은 무엇이고, 어디에 작용하는가?**
- 작용하는 하중이 **정적 하중인가, 동적 하중인가?**
- **하중이 작용하는 경로(Load path)** 어떻게 구성되어 있는가?
- **설계 기준**이 무엇인가? (응력, 변위, 변형율, 피로수명 등)
- 높은 응력이 어디에서 발생할 것이며, 제한 기준은 무엇인가?
- 선형 문제인가, 비선형 문제인가?
- 해석 결과를 어떻게 검증할 것인가?

Thank you

2강

해석 종류 선택 방법



CONTENTS

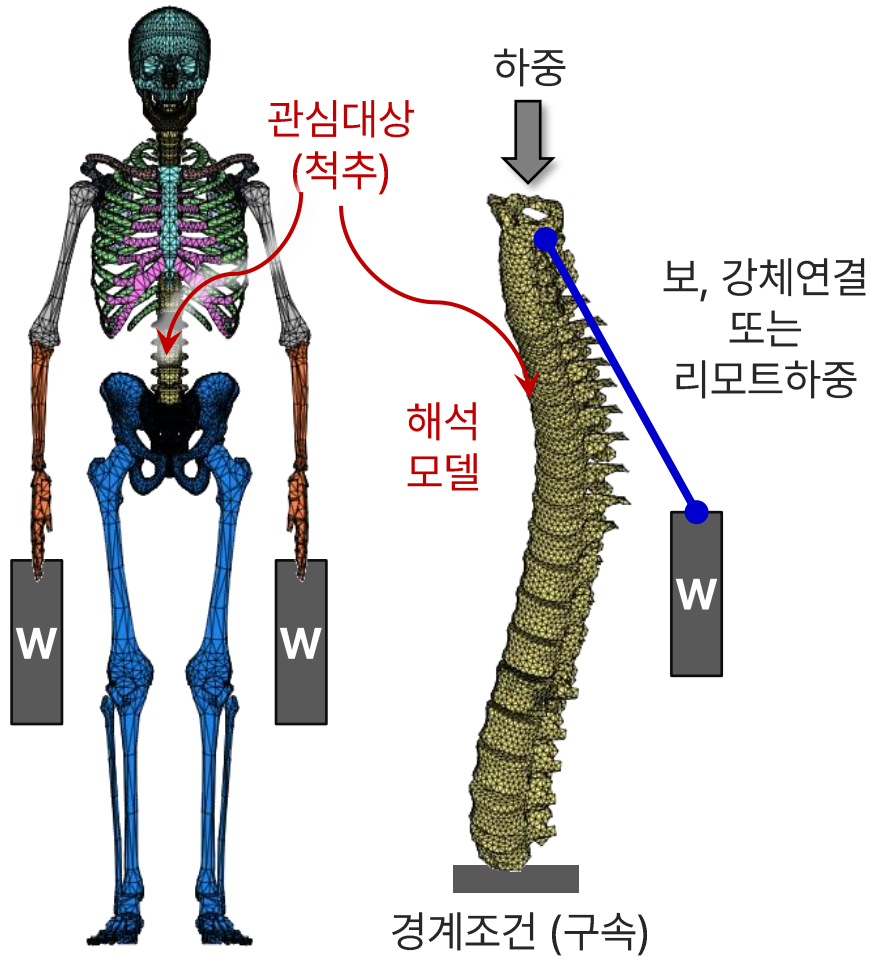
해석 종류 선택 방법

Part 1. 구조해석 운동방정식 이해

Part 2. 강성이란 무엇인가

Part 3. 하중에 따른 해석 분류

어떤 해석을 수행해야 하나?



고유 진동수 해석

응답 스펙트럼 해석

주파수 응답 해석(모드법)

자유수면 유동 해석

선형정적해석

과도상태 유동 해석

비선형 정적 해석

랜덤 해석(모드법)

비선형 과도 열전달 해석

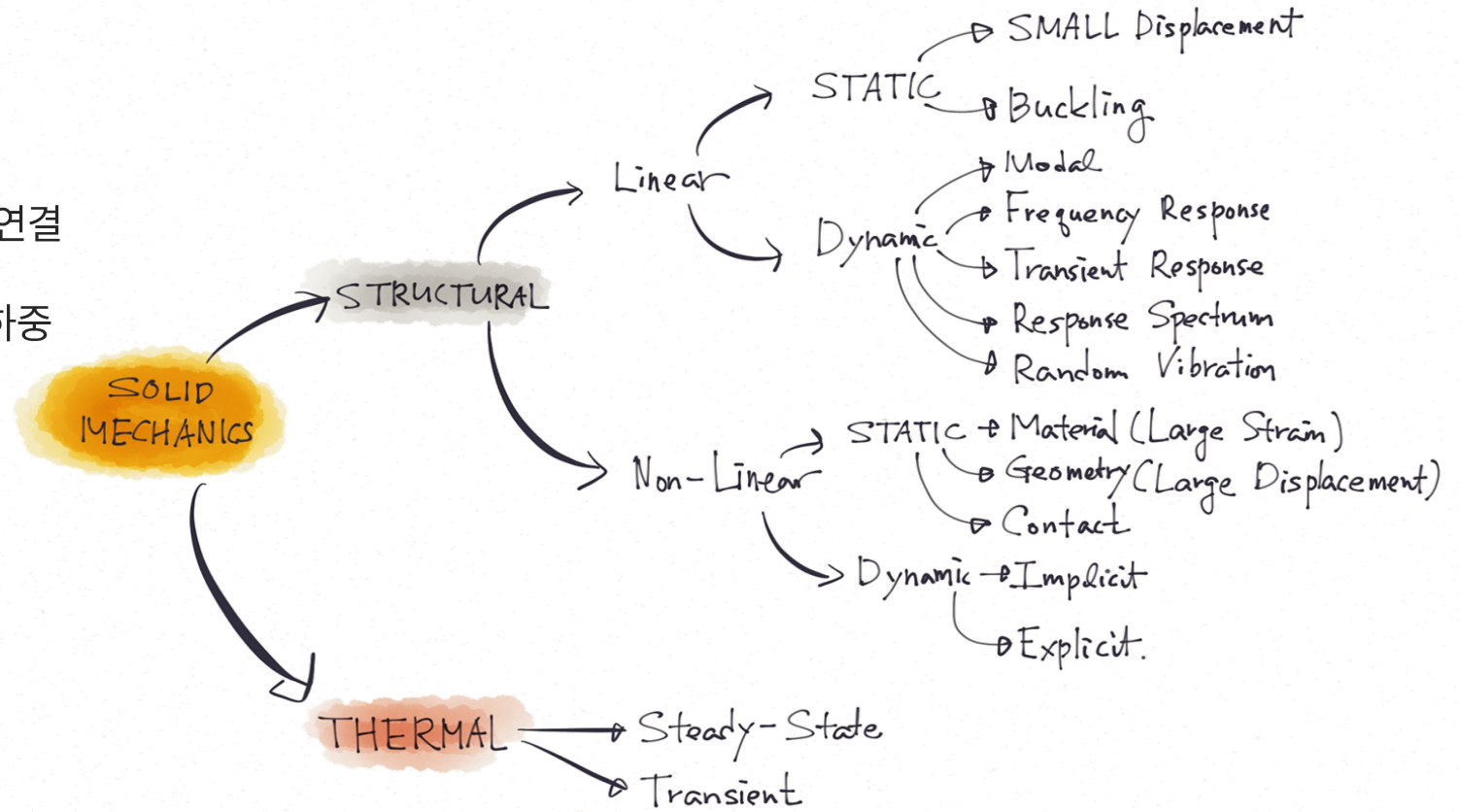
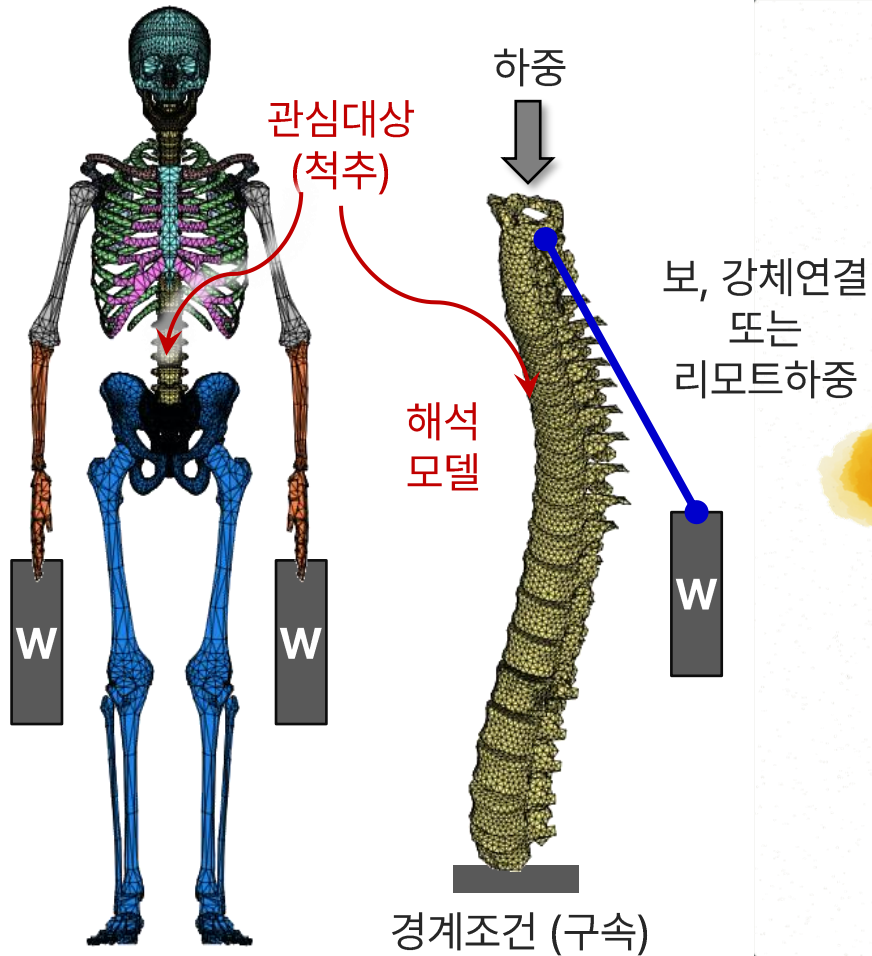
좌굴 해석

외연적 비선형 동해석

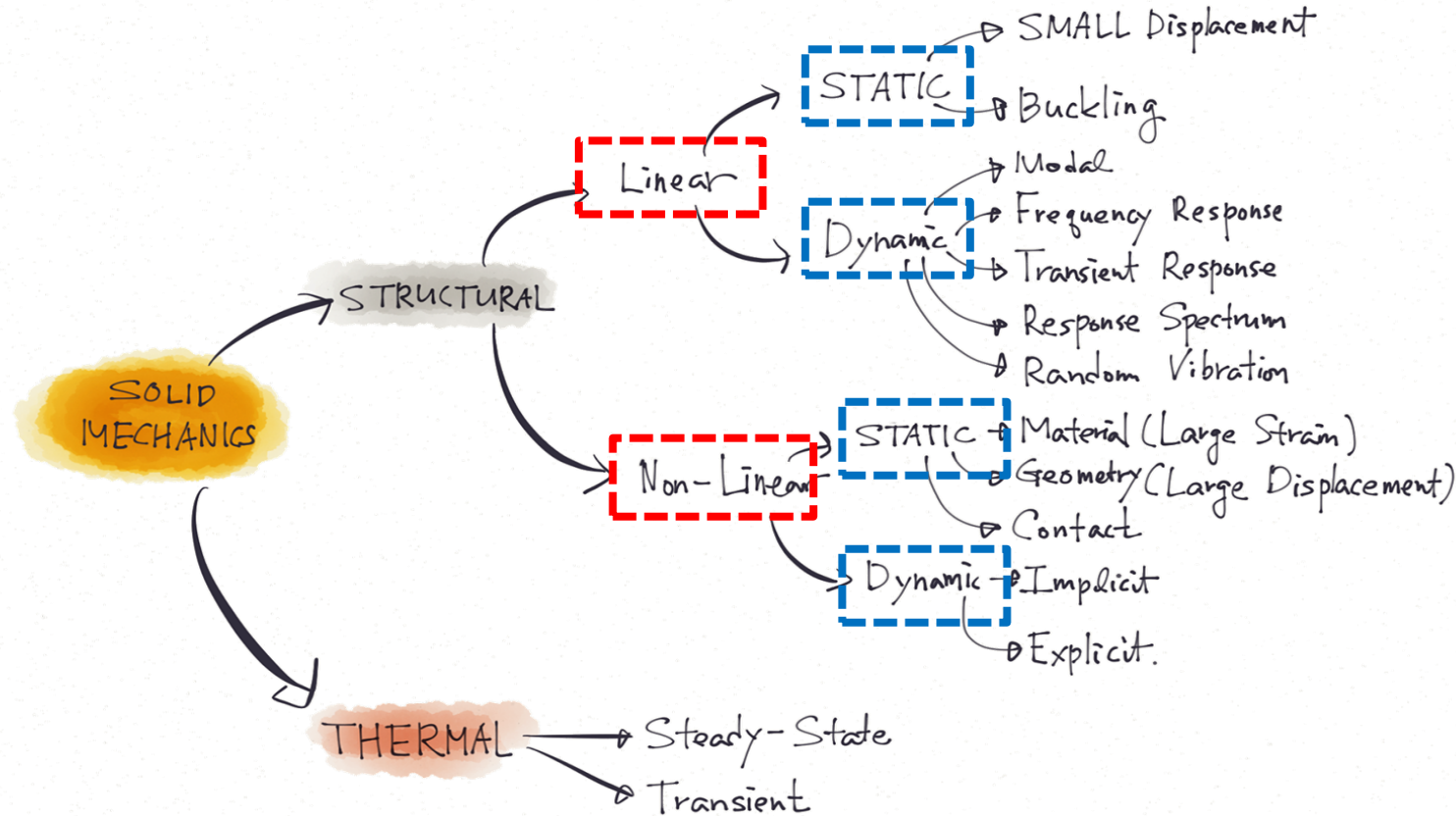
선형 과도상태 열응력 해석

비선형 정상상태 열전달 해석

어떤 해석을 수행해야 하나?



구조(Structural) 해석 종류 이해하기



1차 분류 : Linear / Non-Linear

- Linear(선형) : 강성 변화 없음.
- Non-linear(비선형) : 강성 변화 존재

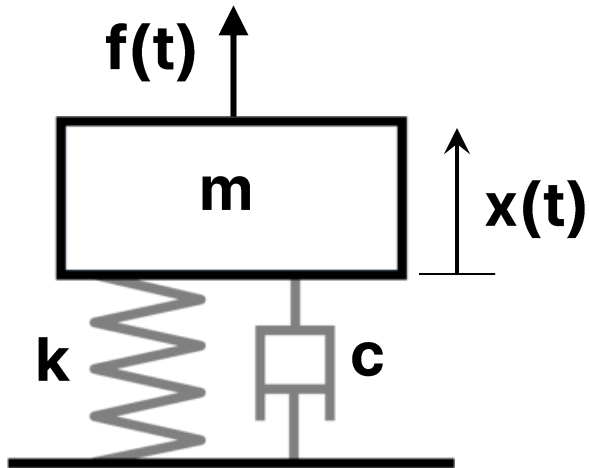
Key Word : 강성(K, Stiffness)

2차 분류 : Static / Dynamic

- Static(정적) : 시간에 따라 하중이 일정한
- Dynamic(동적) : 시간에 따라 하중이 변화한

Key Word : 하중>Loading)

Summary



① 구조해석 운동방정식

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

② Key Word : 강성(K, Stiffness)

1차 분류 : Linear / Non-Linear

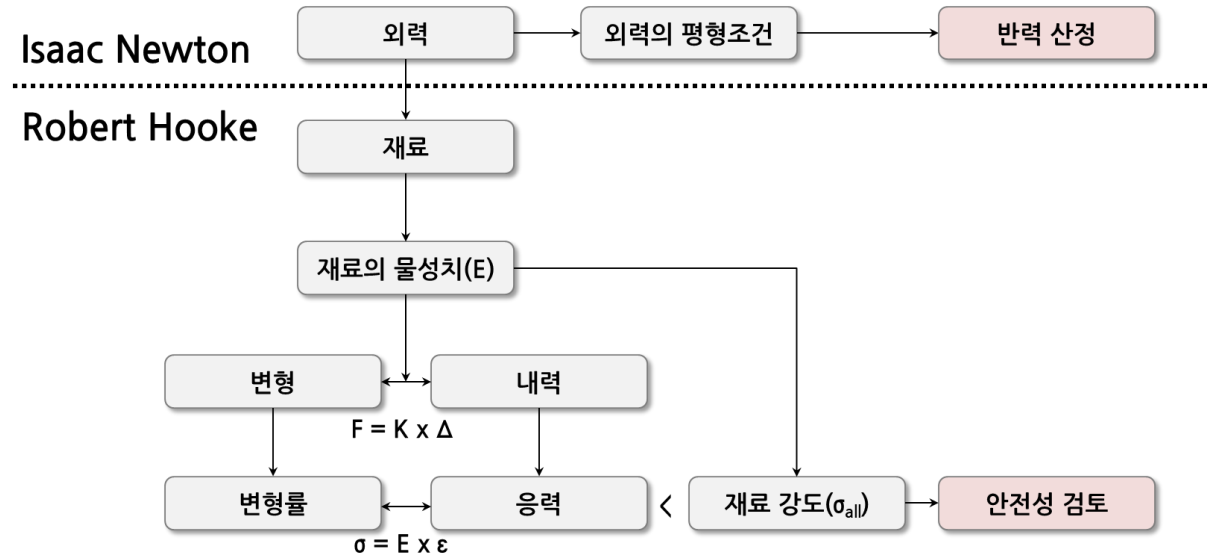
- Linear(선형) : **강성** 변화 없음.
- Non-linear(비선형) : **강성** 변화 존재

③ Key Word : 하중>Loading)

2차 분류 : Static / Dynamic

- Static(정적) : 시간에 따라 **하중**이 일정한
- Dynamic(동적) : 시간에 따라 **하중**이 변화한

구조역학에 대한 배경



CONTENTS

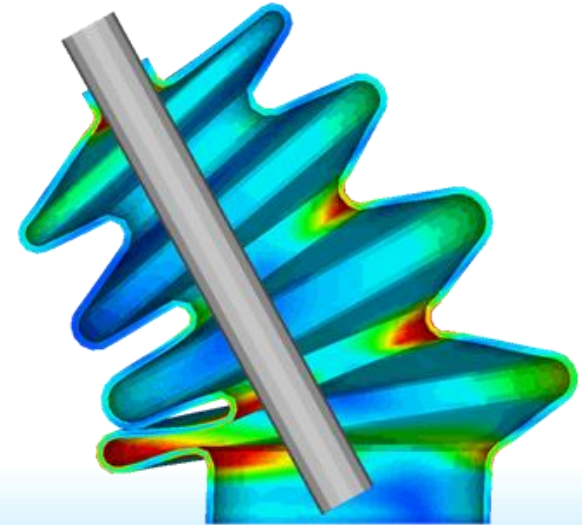
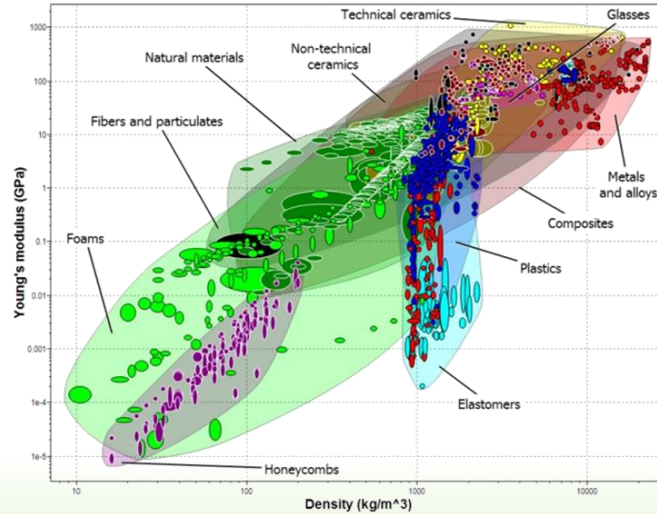
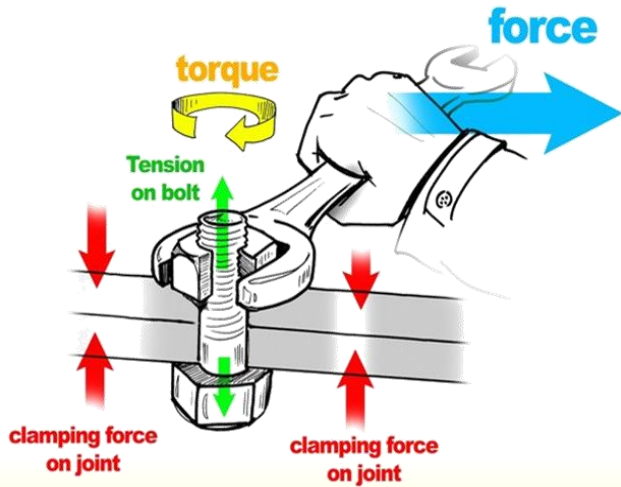
해석 종류 선택 방법

Part 1. 구조해석 운동방정식 이해

Part 2. 강성이란 무엇인가

Part 3. 하중에 따른 해석 분류

구조역학에 대한 배경

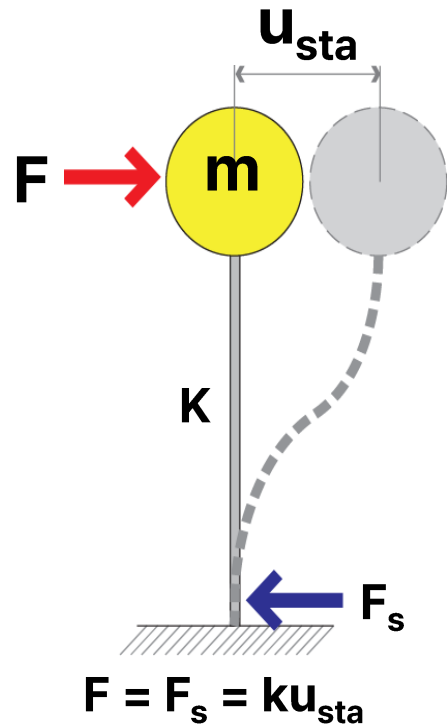


힘

재료

변형

구조역학 적용 예시

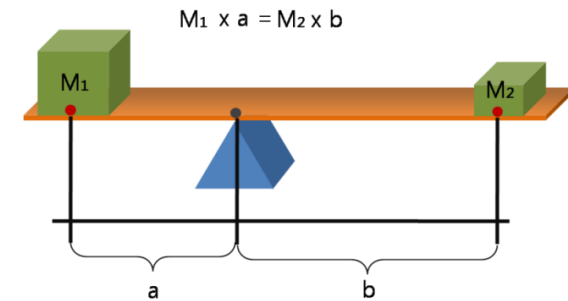
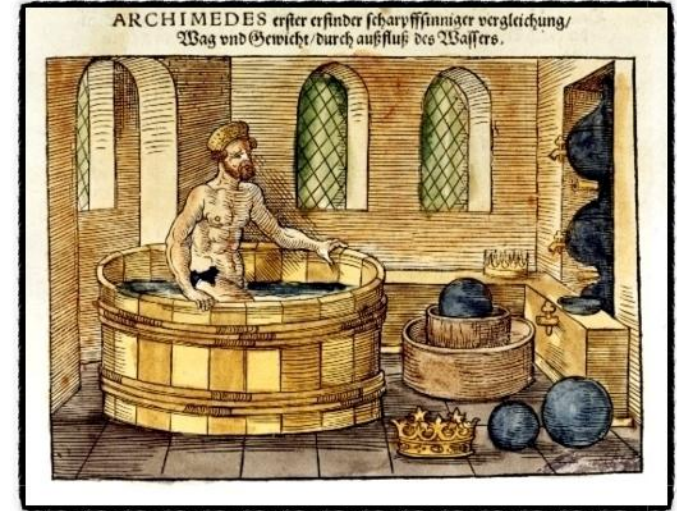
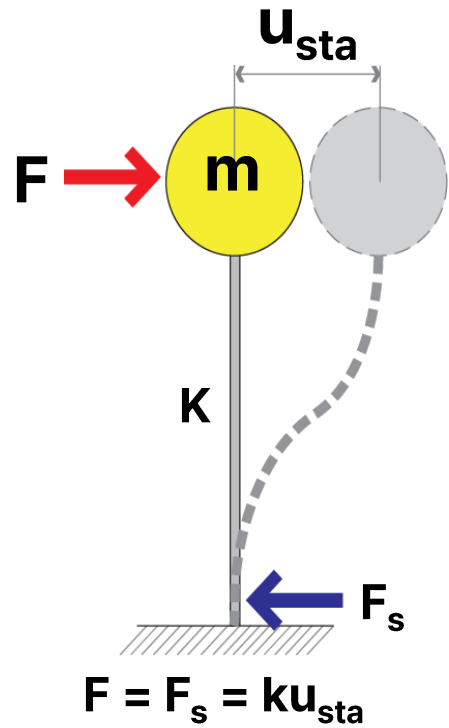


(a) 떡갈나무는 삼나무보다 강하다 (재료의 강도)

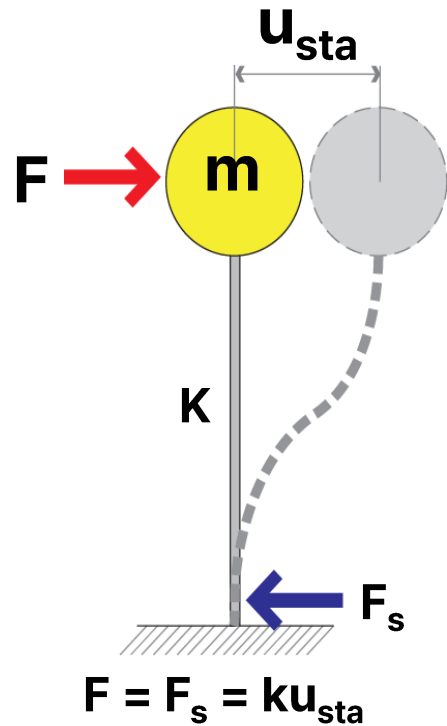
(b) 창끝을 날카롭게 하는 편이 잘 찌른다. (응력의 개념)

(c) 오른쪽의 막대가 운동량 (= 질량 x 속도) 이 크게 나온다.

구조역학 적용 예시



구조역학 적용 예시



Overview

해석의 목적

반도체 CVD 챔버에 가해지는 중력 및 반복적인 진공 하중에 대한 구조 안정성 평가

해석 종류 및 모델

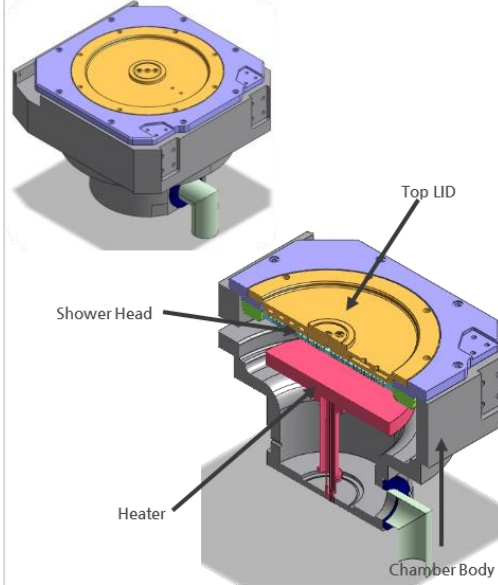
- 선형정적해석



Pre Processing

- 모델링 : 3D Solid Element
- 적용하중 : 자중 + 진공하중

<해석 모델>

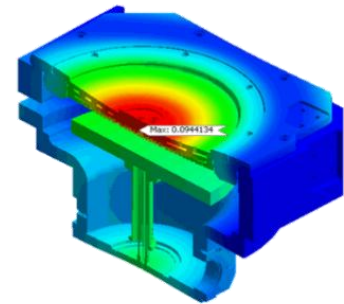


Post Processing

- 안전성 평가
 - 허용 응력에 비해 응력이 매우 작음
- 안전성 중심의 과다 설계로 경제성을 고려한 설계 변경 필요

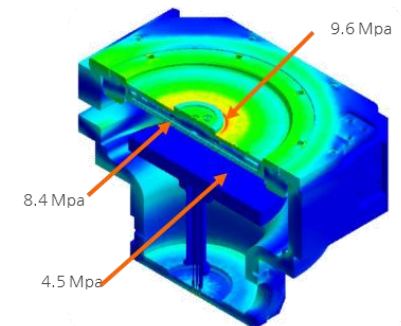
<전체 변형 형상>

최대 변형 발생 : Top Lid 부분, 0.1 mm

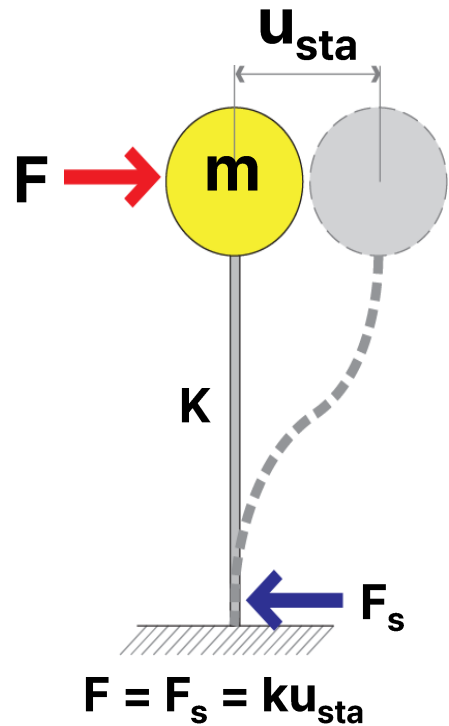




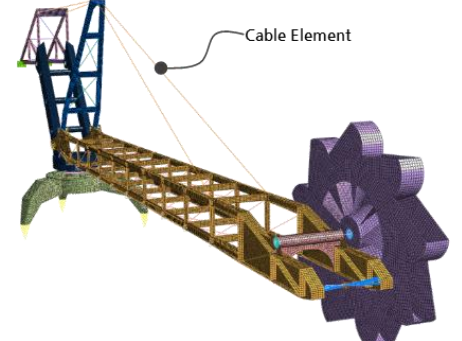
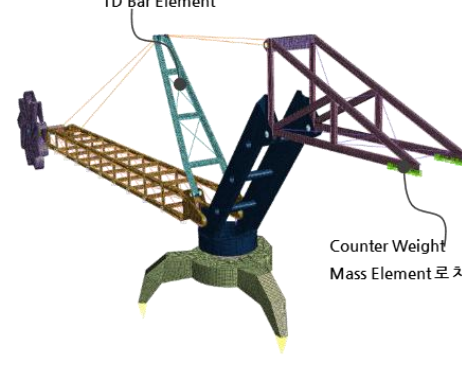
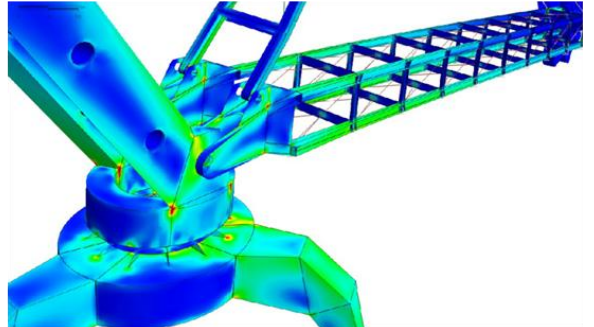
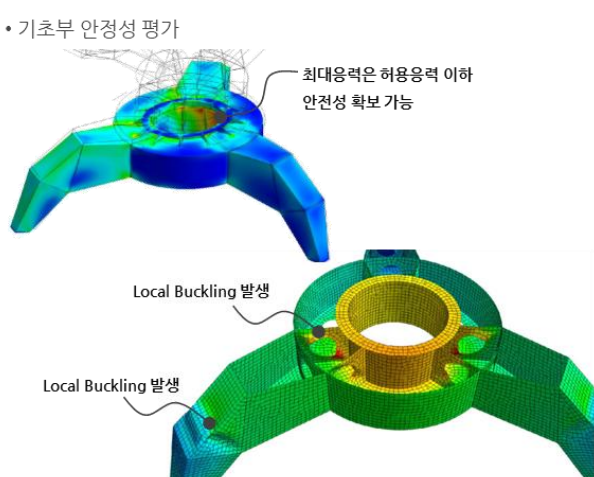
<전체 응력 분포>

최대 응력 발생 : Top Lid 부분, 9.6 MPa

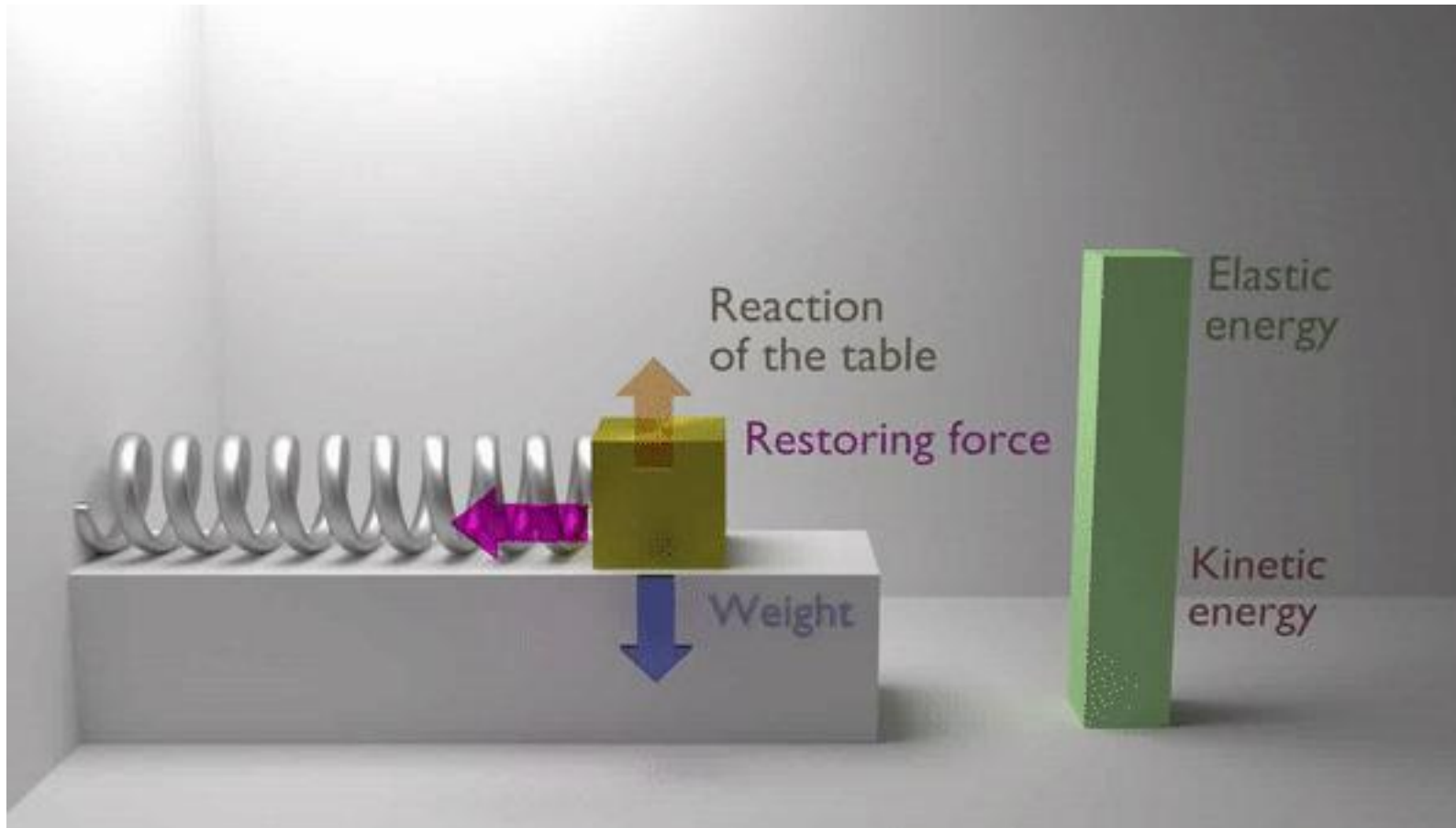


구조역학 적용 예시



Overview	Pre Processing	Post Processing
<p>해석의 목적</p> <p>경량 구조로 새롭게 설계된 Stacker에 컨베이어, 기어 박스 및 버킷 휠의 이동 중에 발생하는 하중에 대한 구조 안전성 및 좌굴 특성 분석</p> <p>해석 종류 및 모델</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 비선형정적해석 ▪ 좌굴해석  	<ul style="list-style-type: none"> • 모델링 : 1D Bar Element & 2D Quad Element • 해석 조건 <ul style="list-style-type: none"> - Stacker 자중 - 컨베이어, 기어박스, 버킷 휠 이동시 발생하는 하중   <p>Counter Weight Mass Element로 치환</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 구조 안전성 평가 • 기초부 안정성 평가  <p>최대응력은 허용응력 이하 안전성 확보 가능</p>  <p>Local Buckling 발생</p> <p>Local Buckling 발생</p>

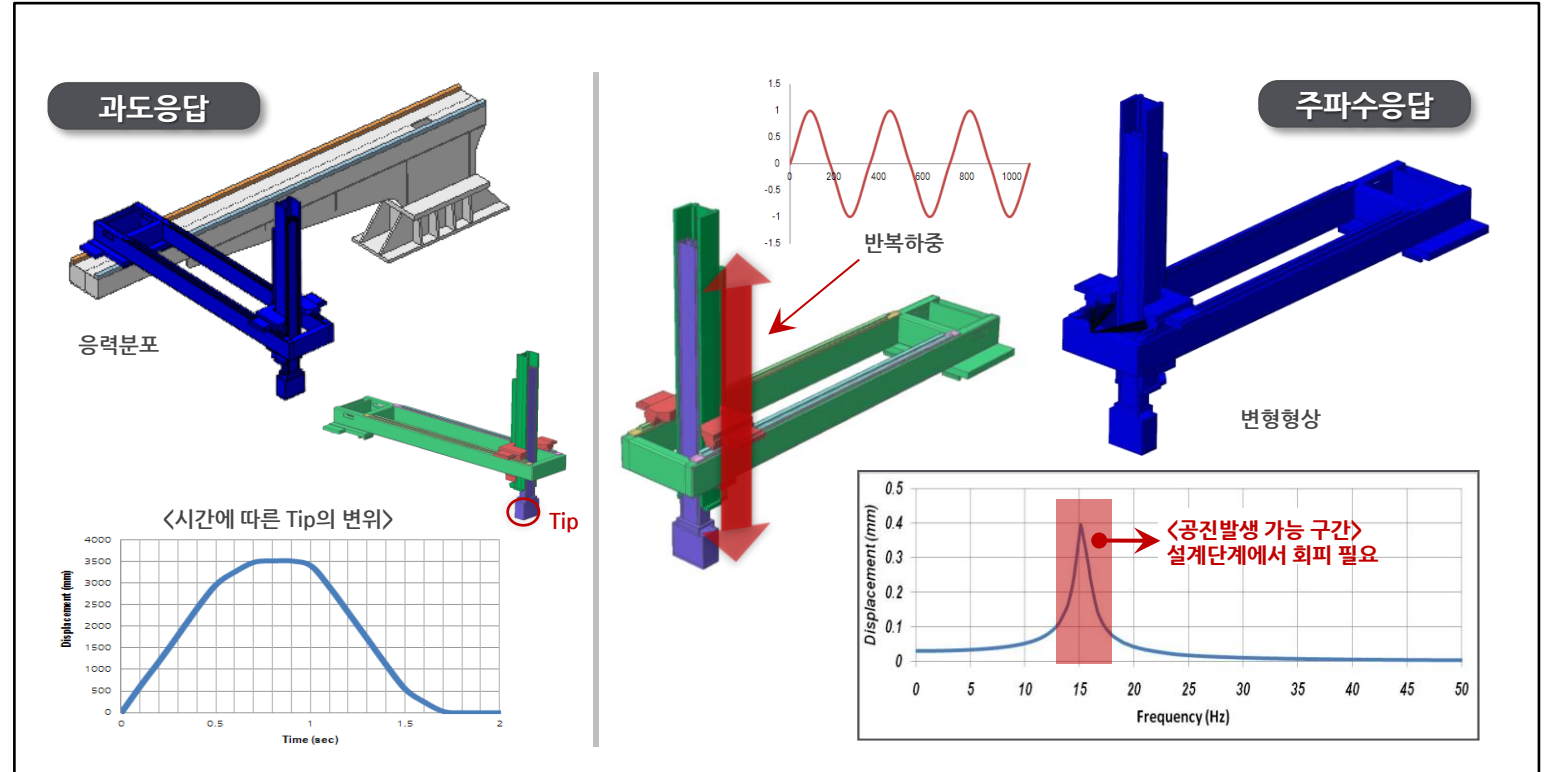
움직이는 물체에 대한 예시



구조해석 운동방정식 배경



구조해석 운동방정식 배경



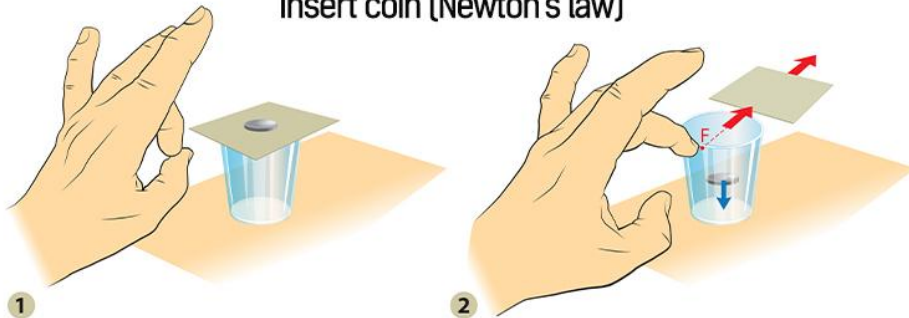
구조해석 운동방정식 배경

관성력

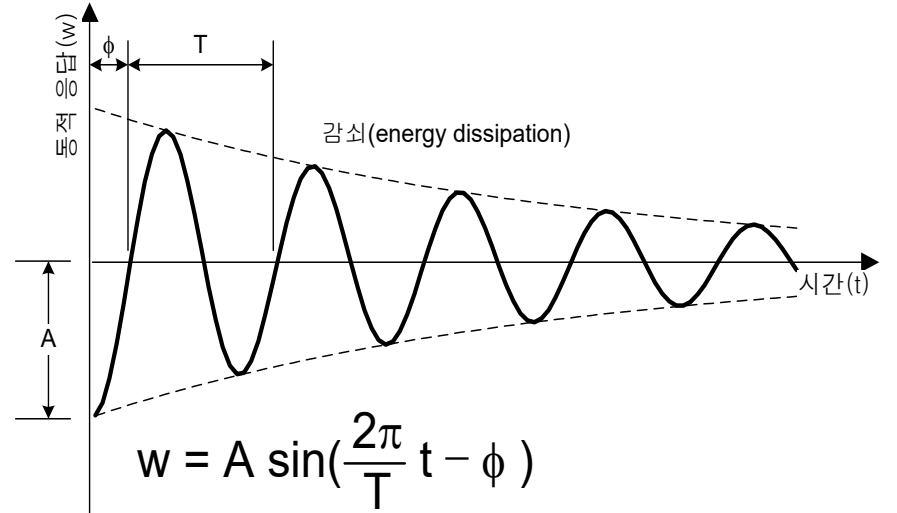
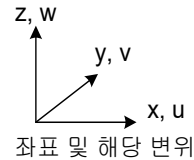
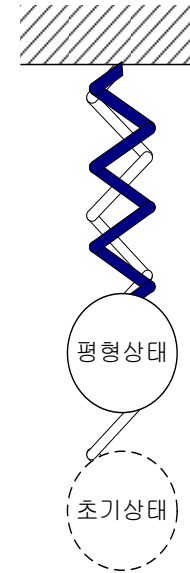


©EnCyber.com

Insert coin (Newton's law)



감쇠력



$$w = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \phi\right)$$

여기서

A = 진폭 (amplitude)

f = 진동수 (frequency) = 1/T

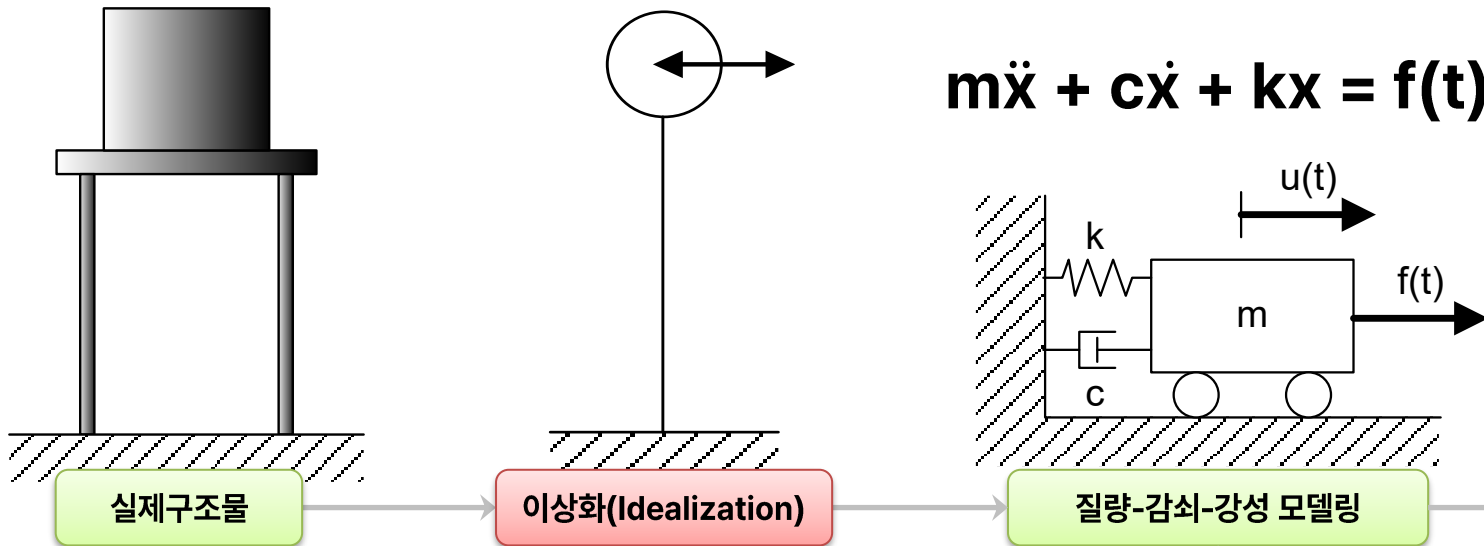
T = 주기 (period)

ω = 각진동수 (angular frequency) = $2\pi f = 2\pi/T$

ϕ = 위상각 (phase angle)

구조해석 운동방정식 발전

- 운동방정식을 유도하기 위한 다양한 방법들이 있지만,
이 방법들은 모두 뉴턴의 운동법칙이 기본인 고전역학을 근거로 하므로, 결국 동일한 방정식이 유도



- 뉴턴의 운동방정식 (Newton's equation of motion)
- 달랑베르의 원리 (d'Alembert's principle)
- 가상일의 원리 (Principle of virtual work)
- 해밀턴의 원리 (Hamilton's principle)
- 라그랑지의 방정식 (Lagrange's equation of motion)
- 운동방정식 산정

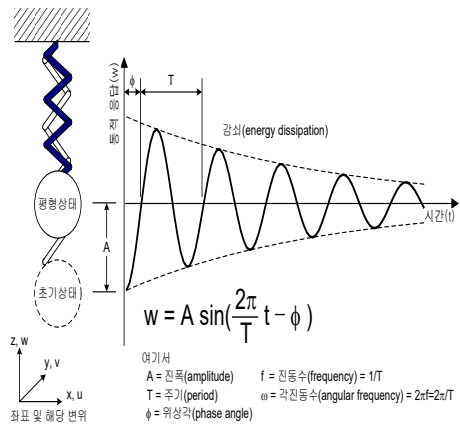
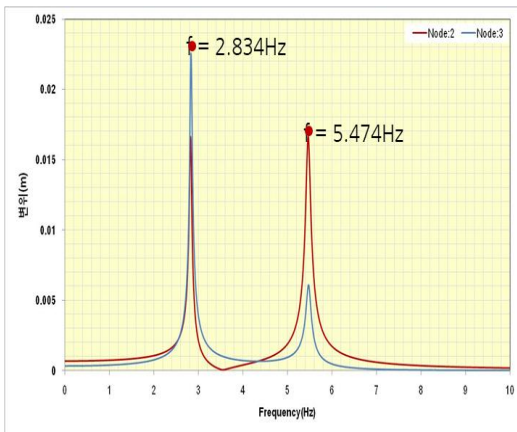
구조해석 운동방정식 이해

(질량) (감쇠비) (강성) (하중)
 관성력 감쇠력 복원력 외력

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

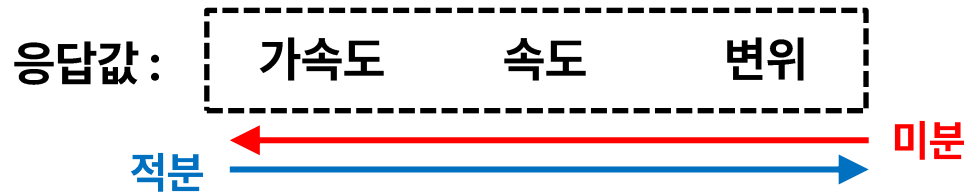
물체의 움직임(동적응답)에 영향을 주는 변수

해석 타입을 결정하는 주요 변수



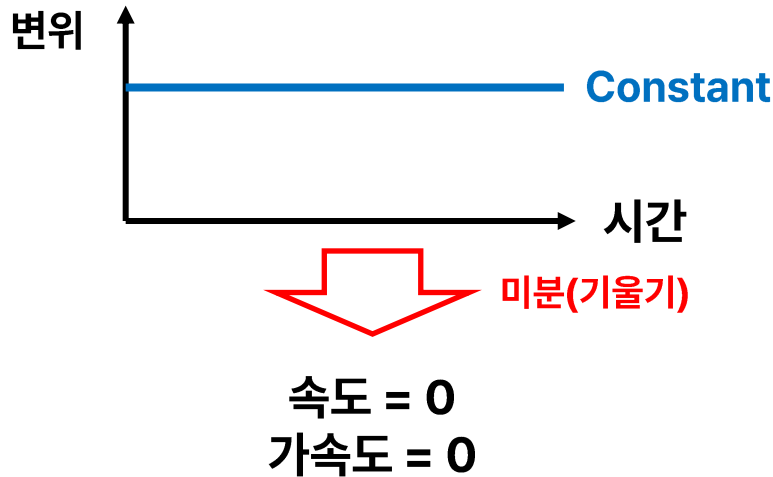
구조해석 운동방정식 이해

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$



정적하중 : 시간에 따라 하중 동일 = 변위 동일

동적하중 : 시간에 따라 하중변화 = 변위변화



□ 변위, 속도, 가속도 그래프

□ 변위, 속도, 가속도 공식

$$y = \int v dt$$

$$= \int (v_0 + at) dt$$

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Integrate velocity to get position ↑

$$v = \int a dt = v_0 + at$$

Integrate acceleration to get velocity ↑

$$a = \text{constant}$$

Motion relationships in one dimension.

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

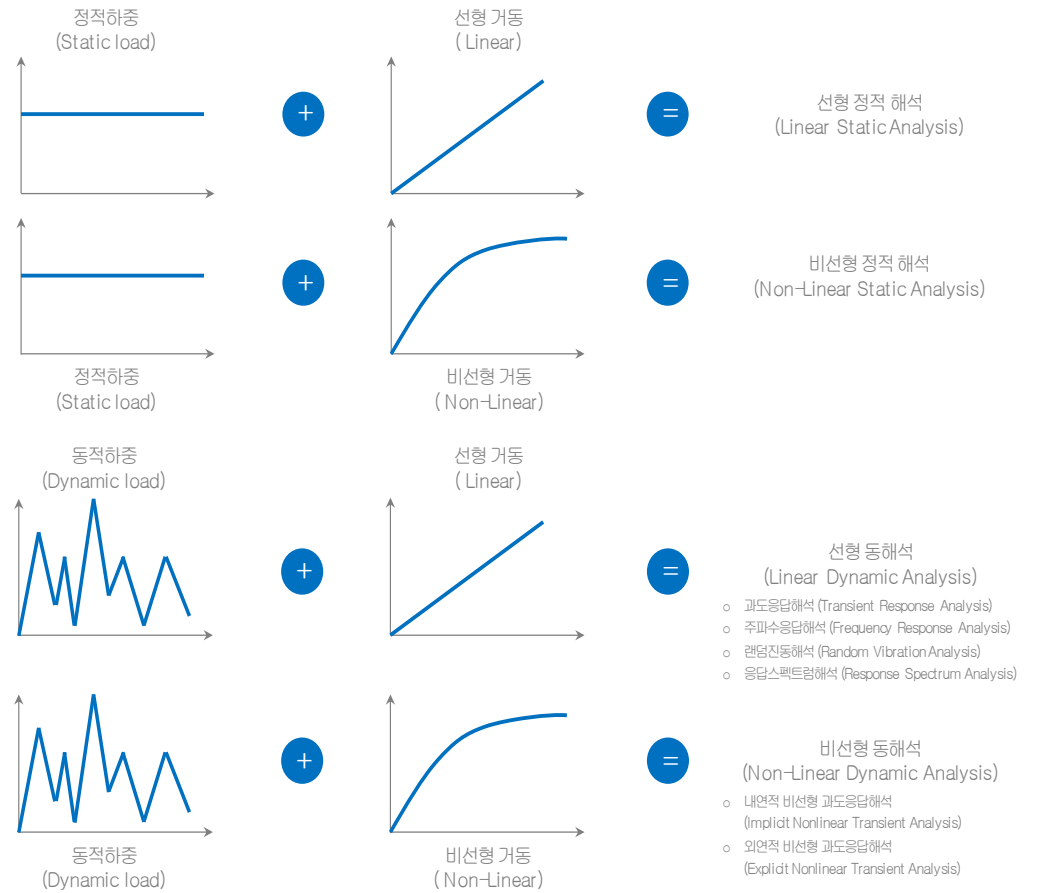
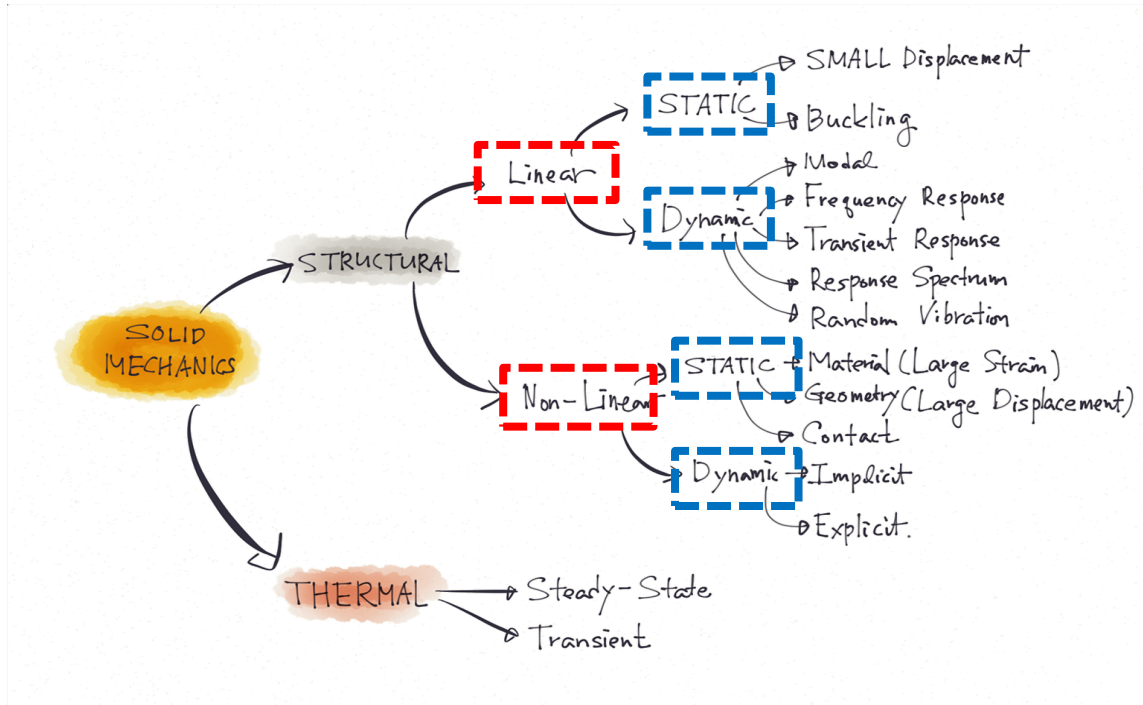
↓ Derivative of position is velocity

$$v = \frac{dy}{dt}$$

↓ Derivative of velocity is acceleration

$$a = \frac{dv}{dt} = a$$

구조해석 운동방정식 이해



CONTENTS

해석 종류 선택 방법

Part 1. 구조해석 운동방정식 이해

Part 2. 강성이란 무엇인가

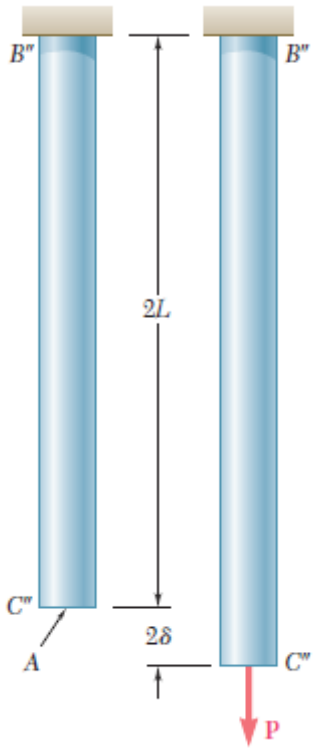
Part 3. 하중에 따른 해석 분류

강성이란?

강성¹, 剛性

명사 물리학

물체가 외부로부터 힘을 받아도 변형되지 않고 본디의 모양을 유지하려는 성질. 특히 비틀림이나 증밀 리기에 대한 탄성을 말함. 고성(固性).



Hooke's Law에 의해

Stress

$$\sigma = E \times \epsilon$$

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Strain

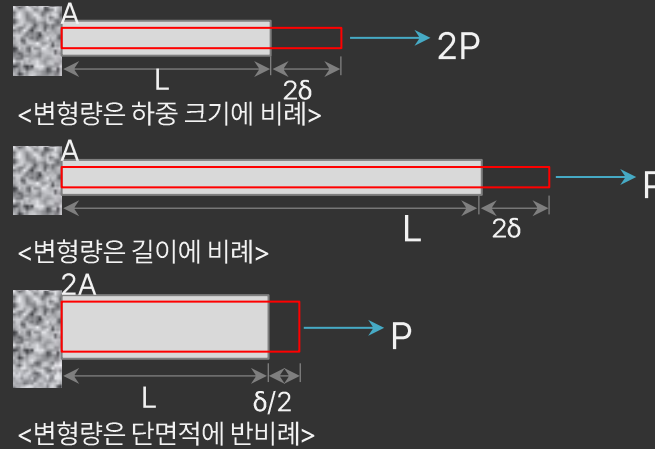
$$\epsilon = \frac{2\delta}{2L}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{E\delta}{L}$$

$$P = \frac{EA}{L} \delta$$

힘과 변형의 관계식

$$P = \frac{EA}{L} \delta \quad F = K \times \Delta$$



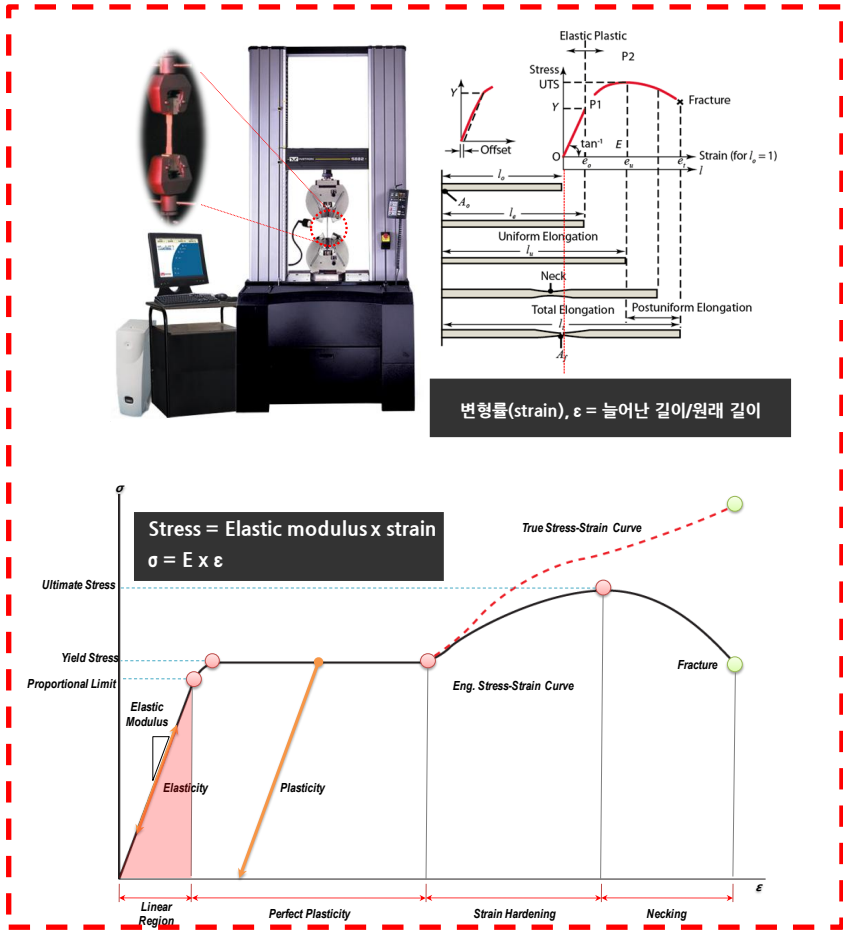
• 힘과 변형의 관계는 재료, 단면 특성, 길이에 비례하고 이를 강성(stiffness)이라 정의

$$F = E \times \frac{A}{L} \times x$$

재료특성 (E)

단면특성 (형상) ($\frac{A}{L}$)

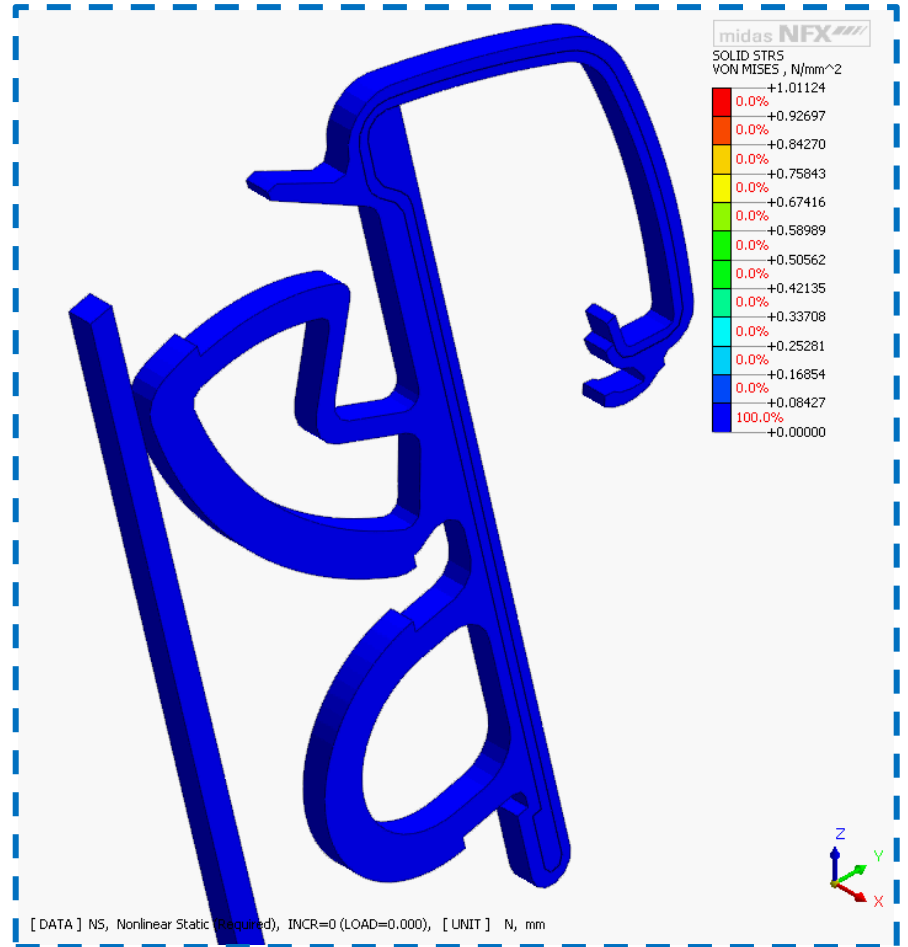
강성의 주요 변수



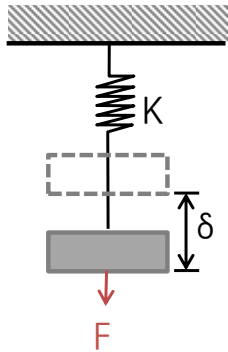
재료특성

$$F = E \times \frac{A}{L} \times x$$

단면특성
(형상)

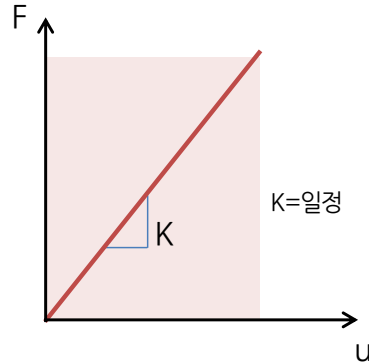


선형(Linear) vs 비선형(Non-linear)



$$F = KU$$

- 1. Linear Material
- 2. Small Displacement
- 3. Static Load/BC

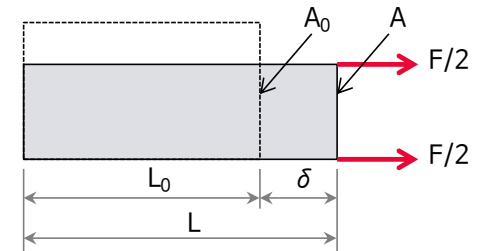
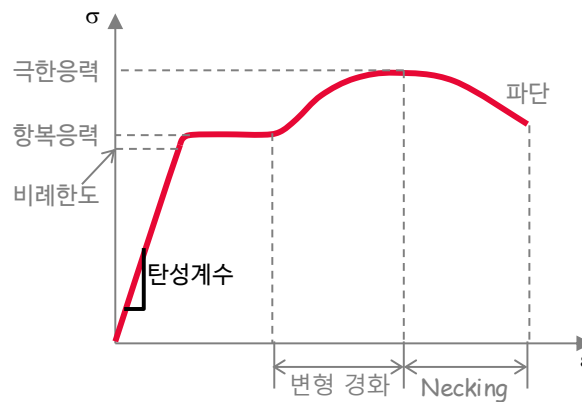
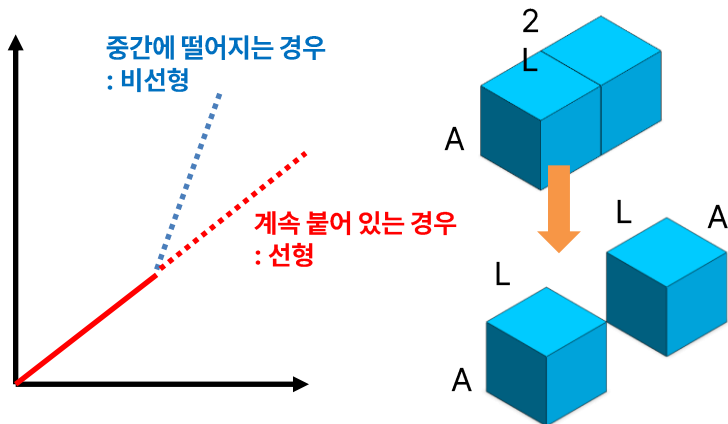


$$F = E \times \frac{A}{L} x$$

1 선형 : 형상 박리 없음
비선형 : 형상 박리 존재

2 선형 : 탄성 / 하나의 E값
비선형 : 소성 / 여러 E값

3 선형 : 미소변형 < 0.2%
비선형 : 대변형 > 0.2%



0.2% 변형률 ?
- L = 1,000mm
- δ = 2mm

선형(Linear) 특징



접촉 선형

물체의 거동에 따라 물체의 **경계조건(접촉)**이 바뀌지 않는 경우



재료 선형

응력-변형률 관계가 **탄성범위**에만 존재하는 경우



기하 선형

물체의 형상이 **미소변형(0.2%)** 및 **하중의 방향 변화 없는** 경우

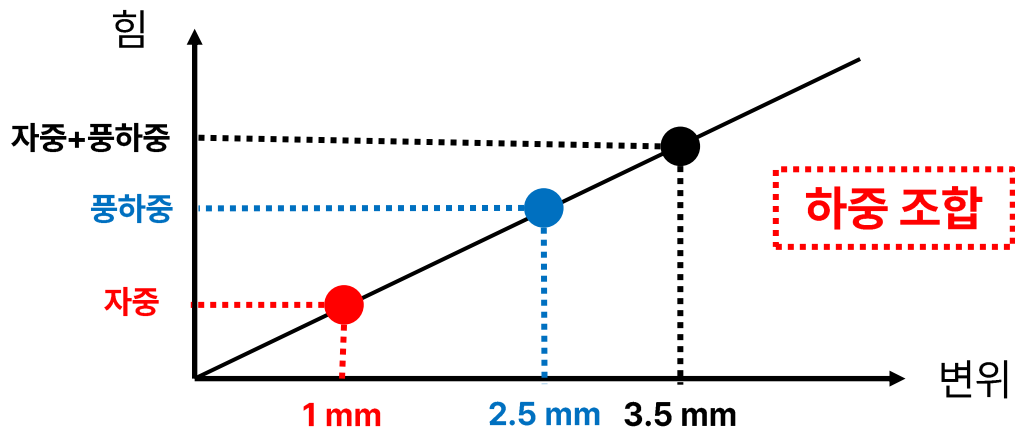
- 모든 구조해석의 80% 는 선형적으로 가정해서 해석을 수행
- 접촉(형상), 재료(탄성), 기하(미소변형) 3가지 조건을 모두 충족해야만 선형 해석 가능
- 단일 강성(K, Stiffness) 로만 계산하기 때문에 요구되는 행렬계산 시간이 짧으며, 지정된 조건하에 결과를 얻는데 효율 적임
- 중첩(Superposition) 원리를 이용해 하중조합이나 예측이 가능

선형(Linear) 특징

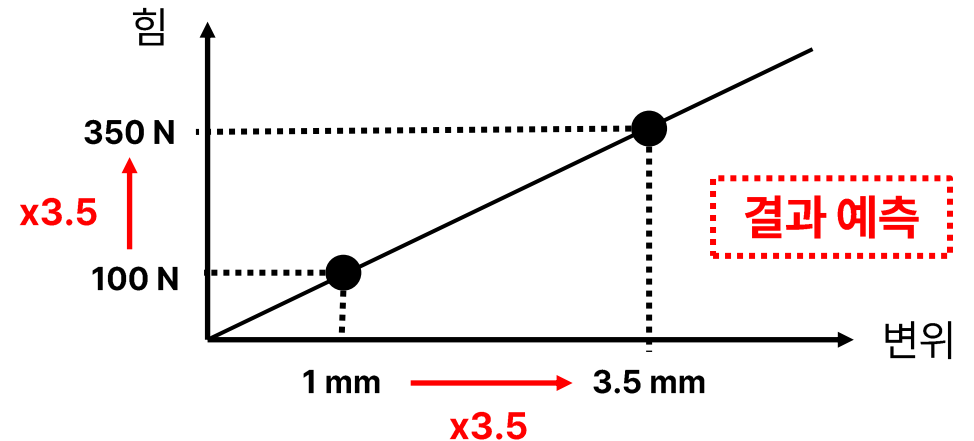
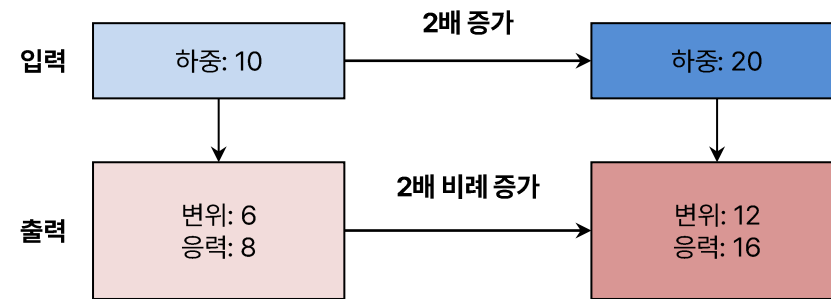
: 선형해석의 가장 큰 특징은 **중첩(Superposition)의 원리**가 적용 가능하다는 점

원리 1) $f(x + y) = f(x) + f(y)$

여러 개의 하중조건에 대해 개별적인 해석을 수행하고, 그 결과를 조합하여 전체하중 또는 다양한 하중조합에 대한 결과를 계산할 수 있음



원리 2) $f(a \cdot x) = a \cdot f(x)$

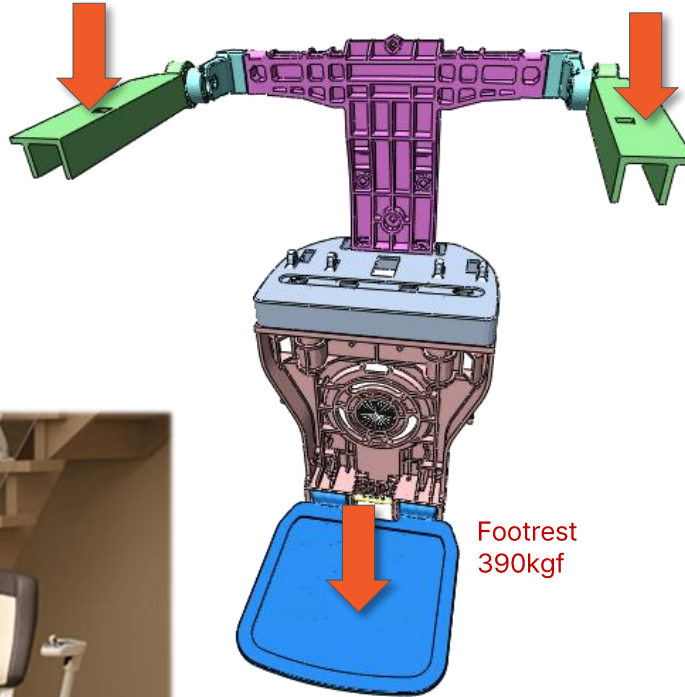


선형(Linear) 사례 : Lifting Chair 구조 강건성 평가



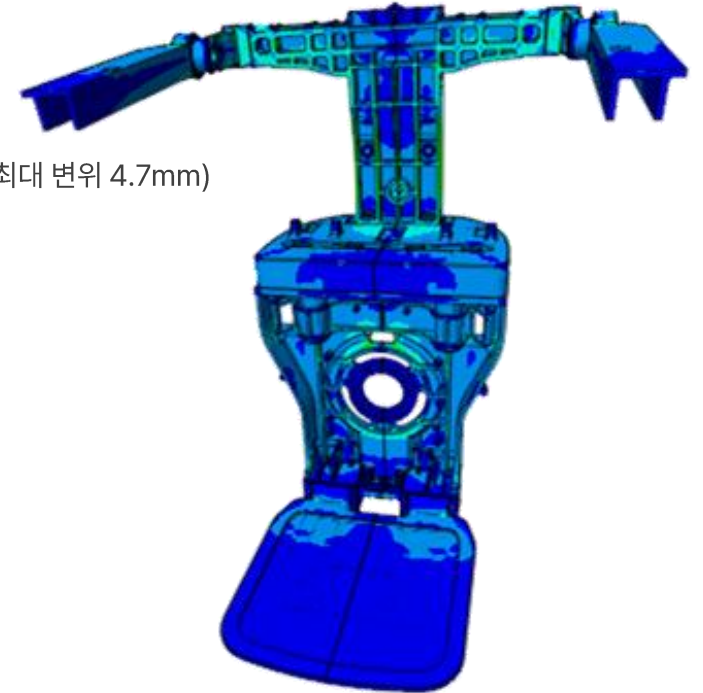
Armrest 65kgf

Armrest 65kgf



Footrest
390kgf

Von Mises 응력분포 (최대 65MPa)



변형 형상 (최대 변위 4.7mm)

최대 변위와 최대응력이
허용범위를 초과하지 않음

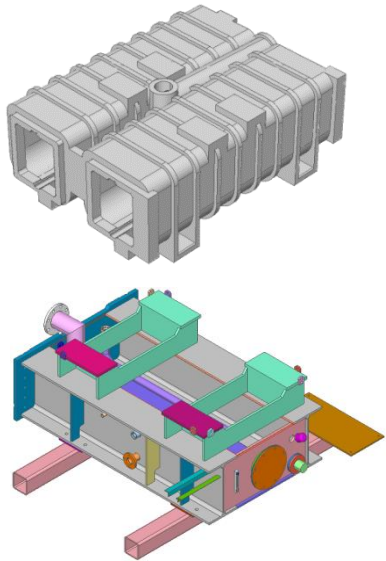
선형(Linear) 사례 : 탱크 구조물 강도 검토

해석의 목적

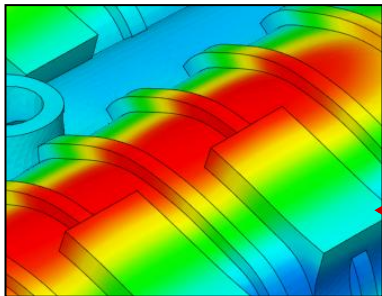
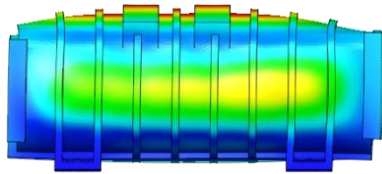
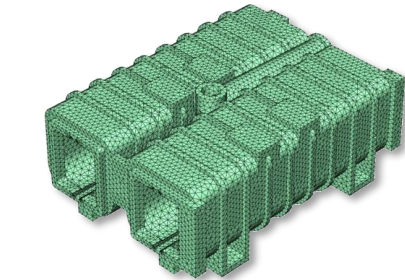
내압을 받는 탱크의 강도 검토

해석 종류 및 모델

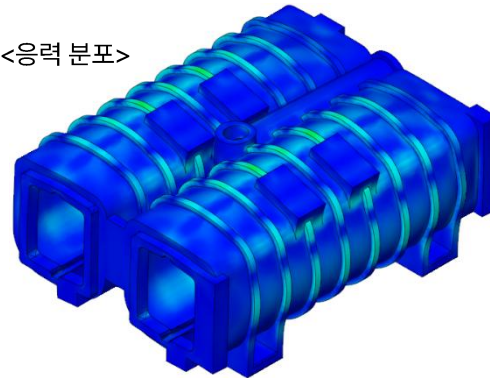
- 선형정적 해석



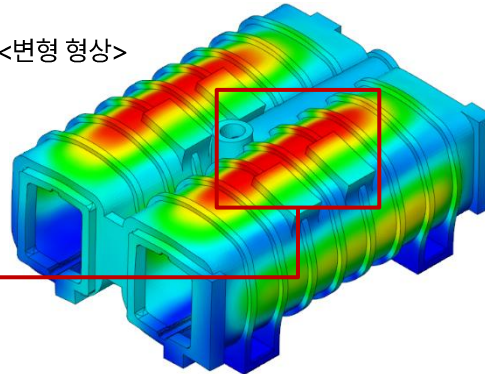
탱크 내압 검토



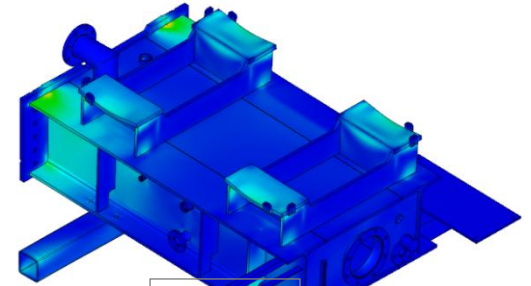
<응력 분포>



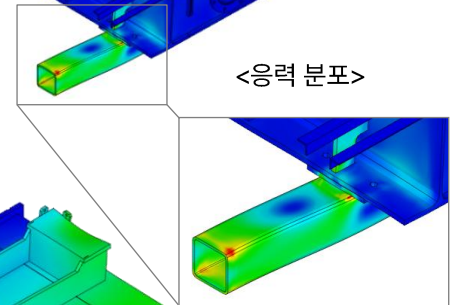
<변형 형상>



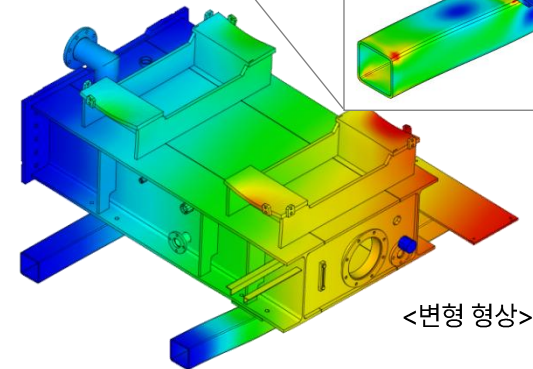
받침대 검토



<응력 분포>



<변형 형상>



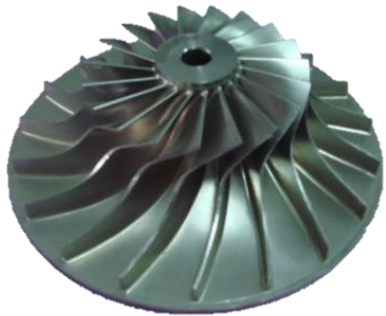
선형(Linear) 사례 : Impeller 구조 안전성 평가

해석의 목적

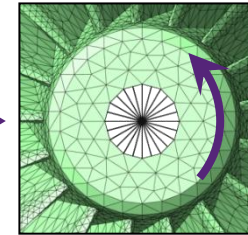
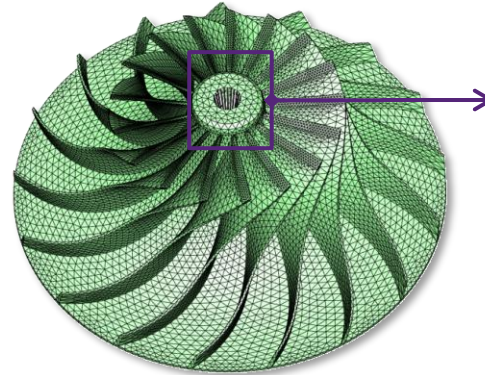
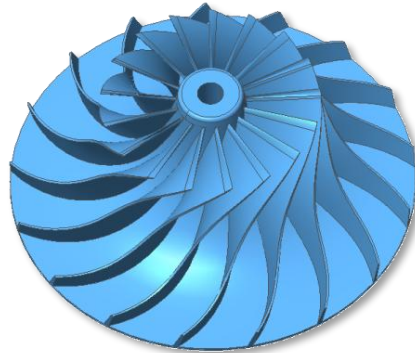
원심력에 대한 임펠러의 구조해석

해석 종류 및 모델

- 선형정적 해석



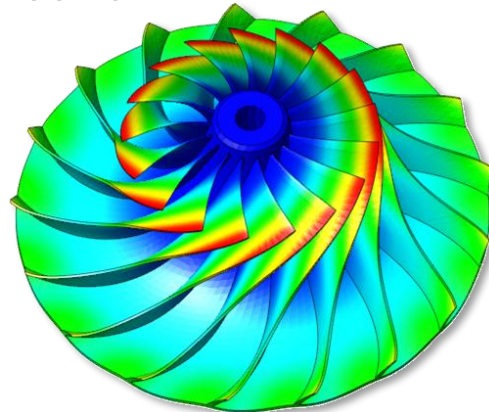
해석 모델



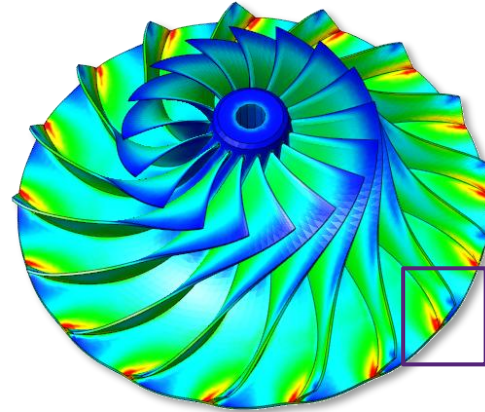
원심력 (RFORCE)

중심에 강제연결 후
구속조건 적용

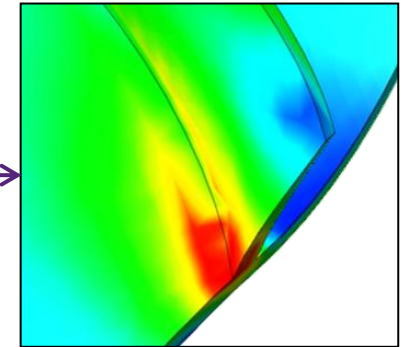
해석 결과



<변위와 변형형상>



<유효응력 분포>



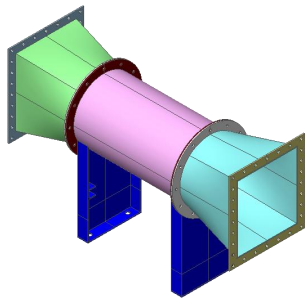
선형(Linear) 사례 : Nuclear Equipment 내진 안전성검토

✓ 해석의 목적

검사기 내부의 스테이지가 S,Y,Z로 3단 구성되어, 모터로 구동하게 되는데, 이 때 모터 구동에 의한 진동이 발생. 진동으로 인한 검사기의 전체 진동을 확인하기 위함이며 최대 변위가 허용범위 이내에 있도록 설계하기 위한 목적

✓ 해석 종류 및 모델

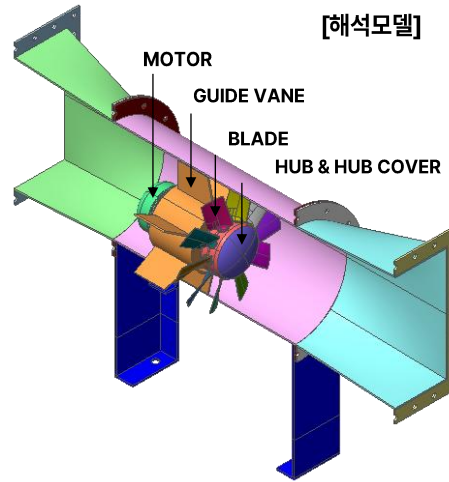
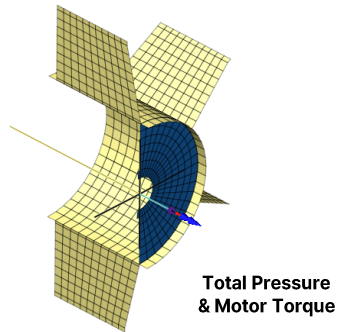
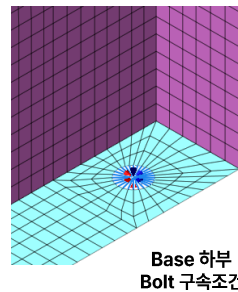
- 선형구조해석
- 모드해석
- 응답스펙트럼해석



선형해석 수행

- 조화응답해석을 통해 모터에 의한 스테이지 이송 시 구조 안전성 검토

[해석조건]



[해석결과]

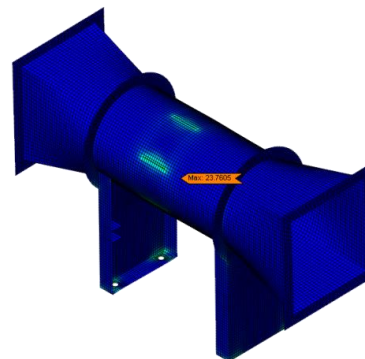
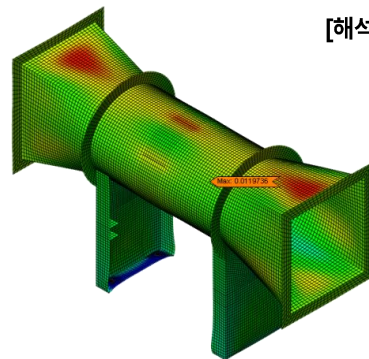


TABLE I - STRESS LIMITS FOR EQUIPMENT & SUPPORTS (EXCLUDING ITEMS ASSOCIATED WITH BUILDING STRUCTURE - REFER TO SKETCH 1)

Stress Limits for ASME Section III Equipment and Supports (use appropriate class and subsections)	Active Uipt.	Passive Equip.	Stress Limits for Non-ASME Section III Equipment and Supports
Service Limit A	Service Limit A	Service Limit A	AISC Steel Construction Manual Section A5.1
Service Limit B	Service Limit B	Service Limit B	AISC Steel Construction Manual Section A5.1
Emergency And Faulted	Thermal Expansion + Equip. Operation Loads + Emergency / Faulted	Service Limit C and D respectively	AISC Steel Construction Manual, section A5.1

Plant Operating Condition	Loading Combination	Stress Value	Allowable Stress
Service Limit A (Normal)	DWO	48.1MPa	150.0MPa (0.6*Sy) ^②
Service Limit B (Upset)	DWO + OBE	138.7MPa	150.0MPa (0.6*Sy) ^③
Service Limit D (Emergency /Faulted)	DWO + SSE	229.4MPa	237.5MPa (0.95*Sy) ^④

NOTE

Sy^① : Yield strength(ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II , Part D)
 0.6*Sy^② : AISC Code, 1980, Section 1.5.1.1(Page 5-40)
 0.6*Sy^③ : AISC Code, 1980, Section 1.5.6(Page 5-30)
 0.95*Sy^④ : These values are 1.6 times higher than Service A limits,

not to exceed 0.95*Sy

선형(Linear) 사례 : 하역설비 충격 안전성검토

✓ 해석의 목적

하역설비 하부의 가진에 대하여 시간에 따른 응답 특성을 파악

✓ 해석 종류 및 모델

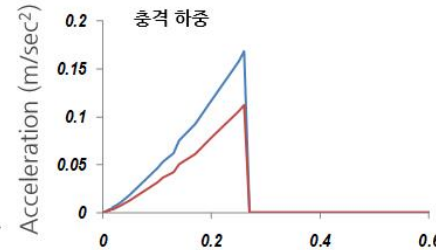
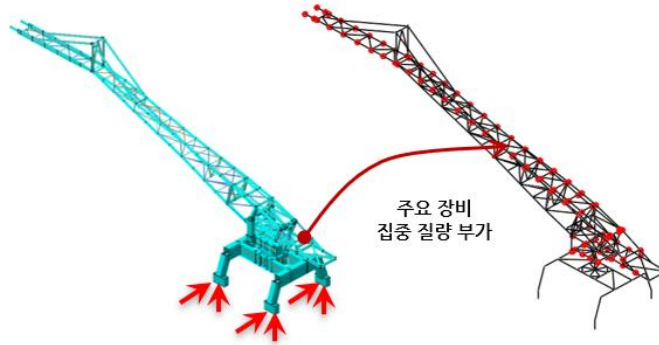
▪ 과도응답해석



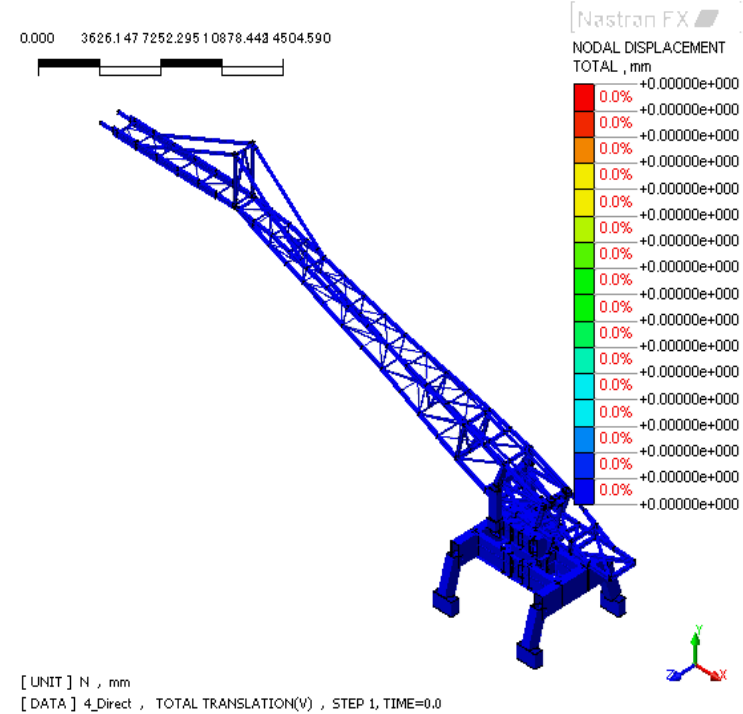
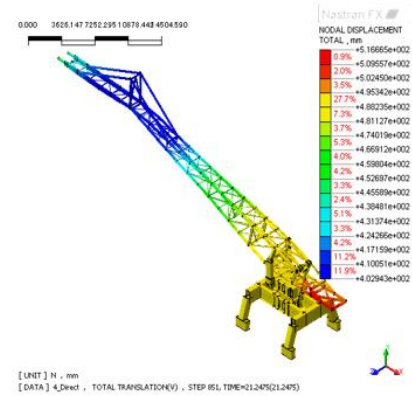
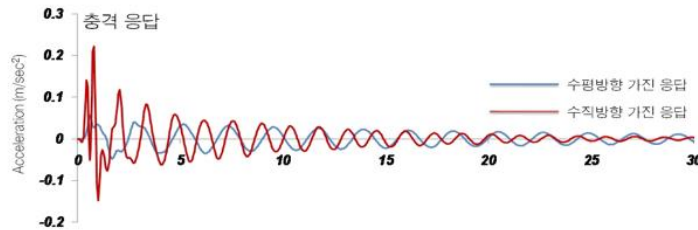
과도응답해석 수행

- 하역설비 하부 프레임에 Y, Z 방향 진동 가속도값 적용
- 시간에 따른 구조물의 가속도, 속도, 변위 결과를 분석하여 구조물의 안정성 파악

[해석모델]



[해석결과]



비선형(Non-linear) 특징



접촉비선형

물체의 거동에 따라 물체의 **경계조건(접촉)**이 바뀌는 경우



재료비선형

응력-변형률이 **탄성범위를 벗어나거나 비선형적 탄성**을 나타내는 경우



기하비선형

물체의 형상이 **과도한 변형**을 일으키거나 **하중의 방향이 변하는 경우**

- 실제 물리현상은 대부분 비선형
- 비선형 구조물의 기본적인 특성은 하중의 변화에 따라 구조물의 강성(Structural Stiffness)이 변함
- 비선형 구조물의 하중-변위 관계는 비선형적인 함수로 표현됨
- 비선형성이 무시할 정도로 작은 경우 선형으로 가정하여 해석 (효율적)

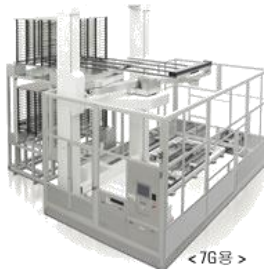
비선형(Non-linear) 사례 : LCD Glass 처짐

✓ 해석의 목적

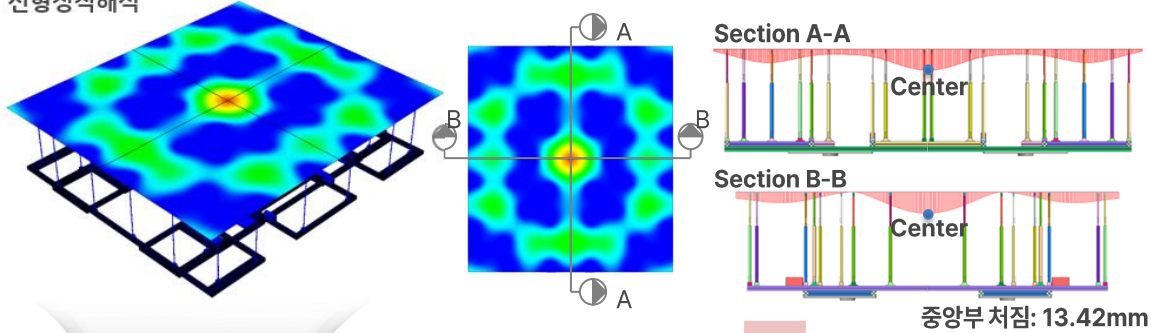
중력에 의한 Glass의 처짐과 비선형성을 고려한 Glass 처짐의 검토

✓ 해석 종류 및 모델

- 선형정적해석
- 비선형정적해석

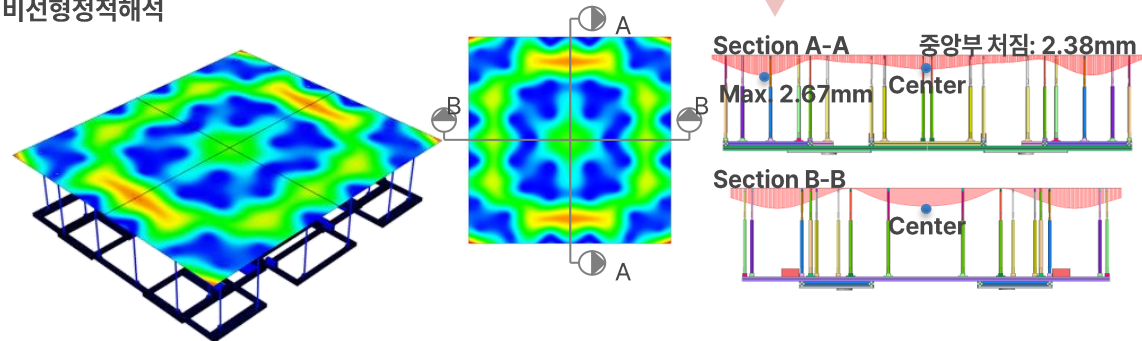


선형정적해석

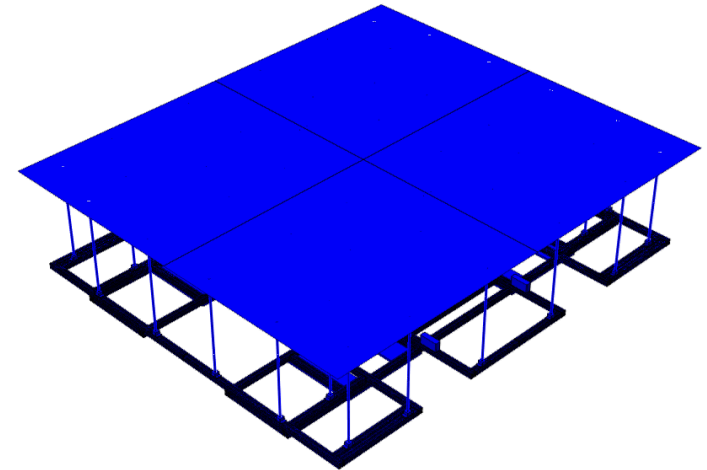


대변형을 고려한 기하 비선형 해석

비선형정적해석



기하 비선형 고려시
82% 처짐 감소



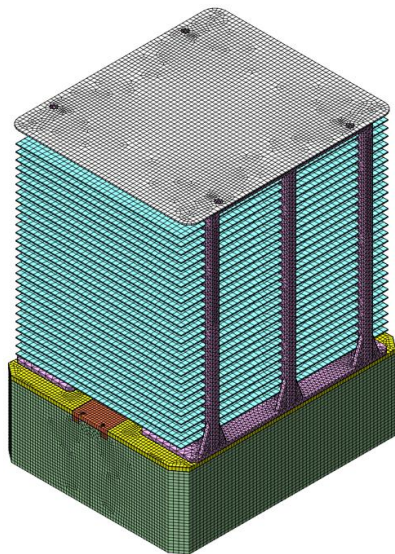
비선형(Non-linear) 사례 : 챔버 내 트레이 구조물 안전성 검토

✓ 해석의 목적

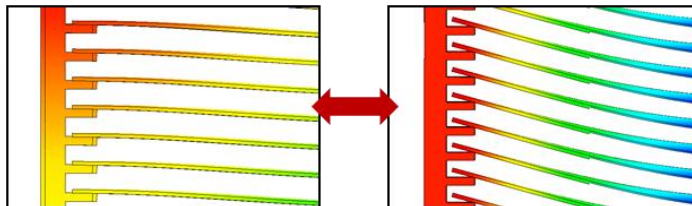
자중 및 고온조건에 의한 처짐 검토

✓ 해석 종류 및 모델

- 선형/비선형 접촉해석

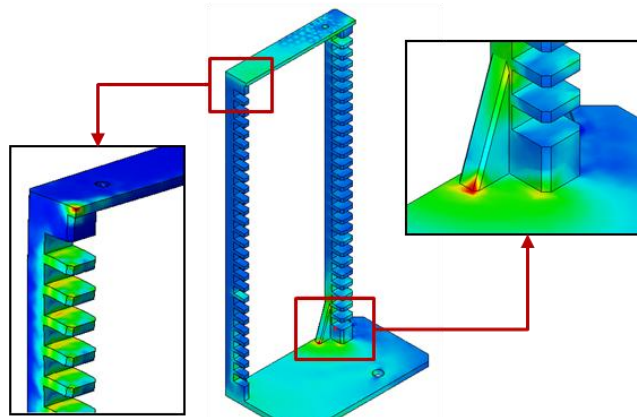


하중조합 케이스에 의한 처짐형상

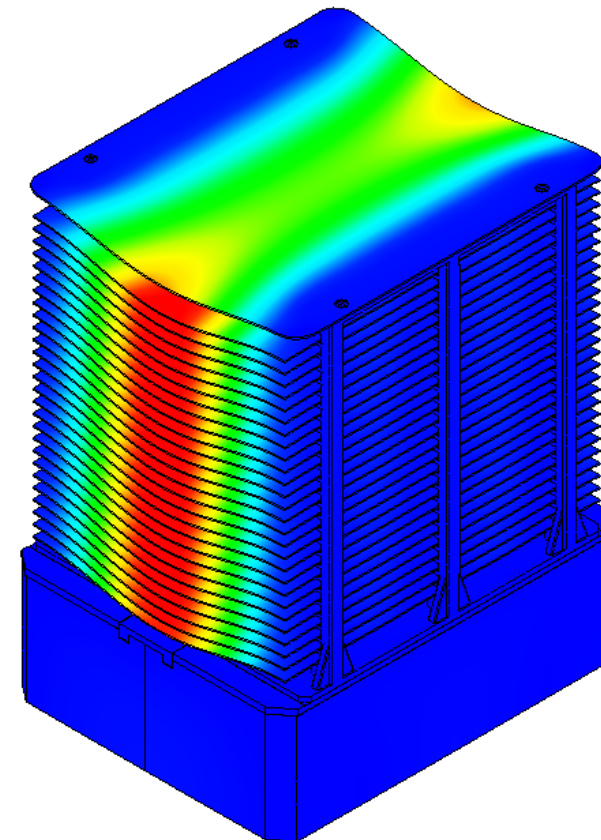


선형 일체접촉
끝단의 일체거동으로 중앙
부 처짐량이 작음

비선형 거친접촉
끝단의 들림으로 중앙부
처짐량이 큼 → 실제와 유사



구조물의 응력과 변형 검토



비선형(Non-linear) 사례 : Burn-in socket 접촉핀의 접촉력 검토

✓ 해석의 목적

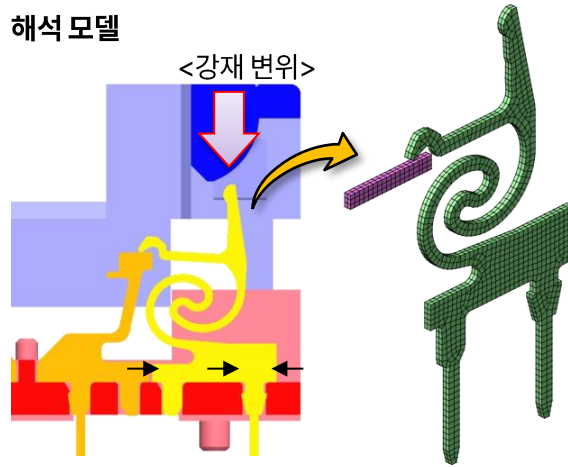
Burn-in socket에 사용되는
접촉핀의 접촉력(Contact force)
을 측정한다.

✓ 해석 종류 및 모델

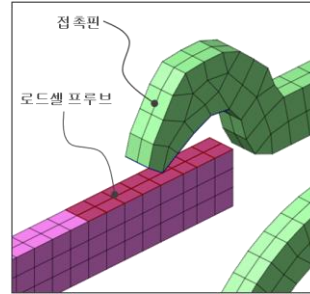
- 비선형정적해석



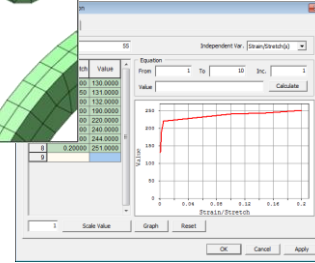
해석 모델



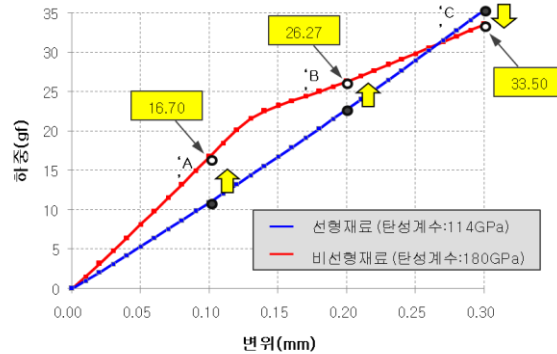
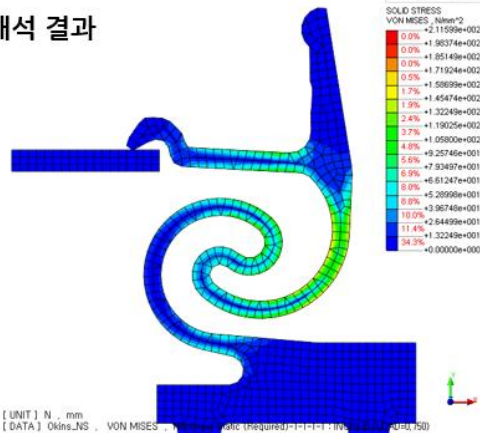
<접촉 비선형>



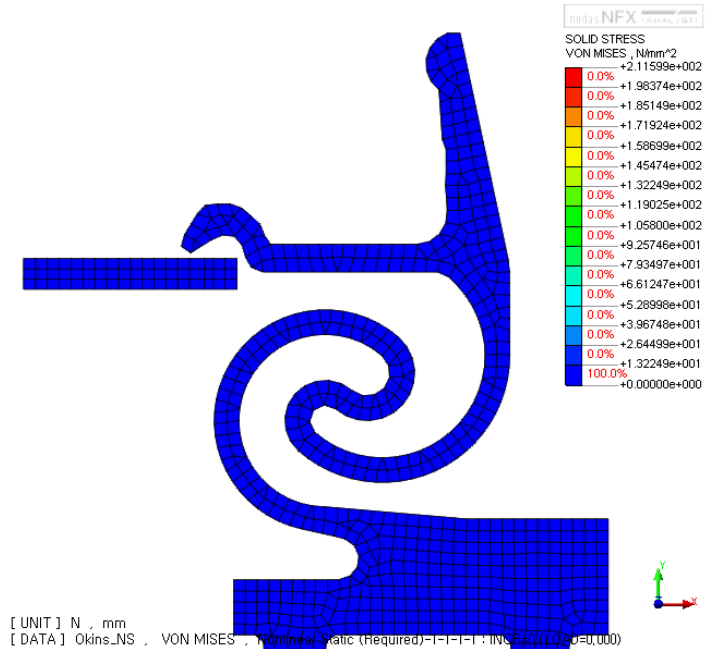
<재료 비선형>



해석 결과



<접촉력 계산>

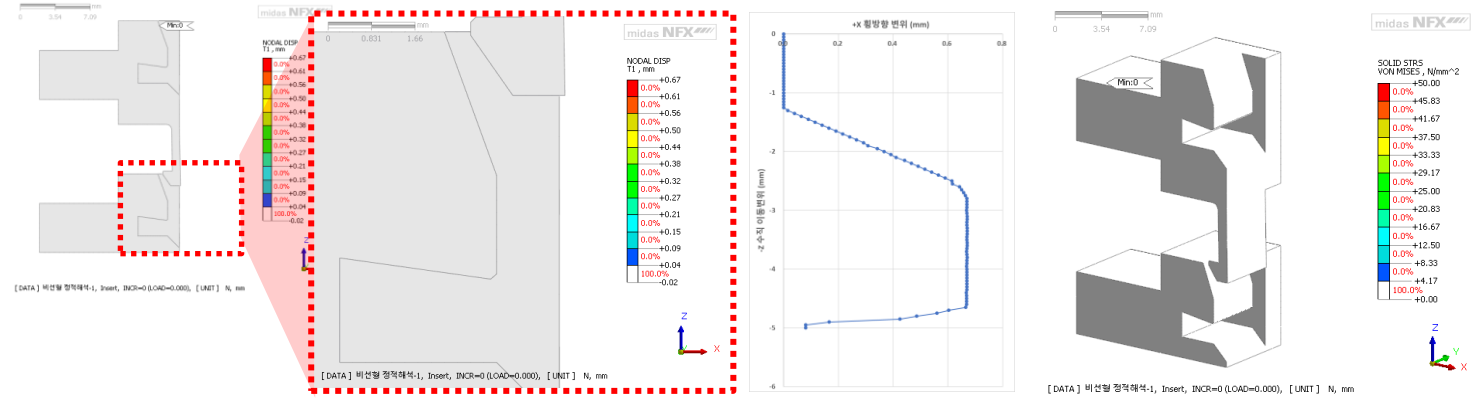


비선형(Non-linear) 사례 : Snap-fit 형상별 검토

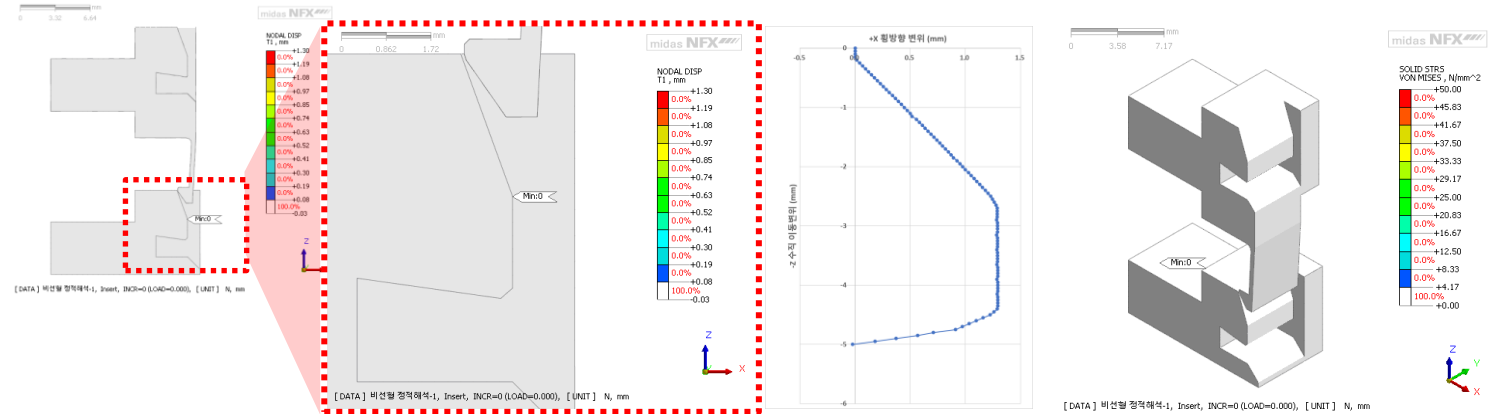


[ESS Battery pack]

Case 1 : 체결부 각도 -1도



Case 1 : 체결부 각도 -3도

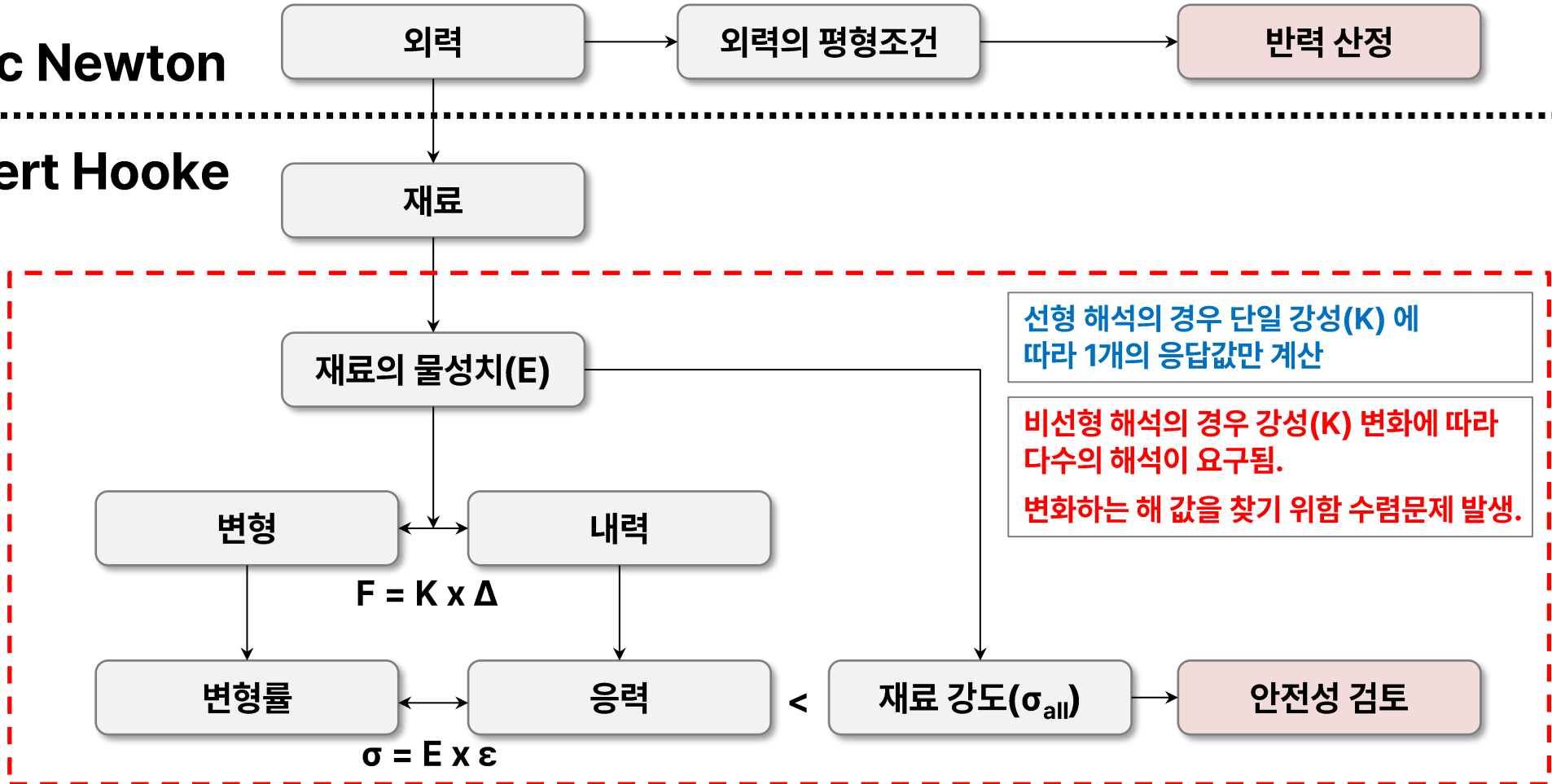


선형(Linear) vs 비선형(Non-linear) 차이

Isaac Newton



Robert Hooke



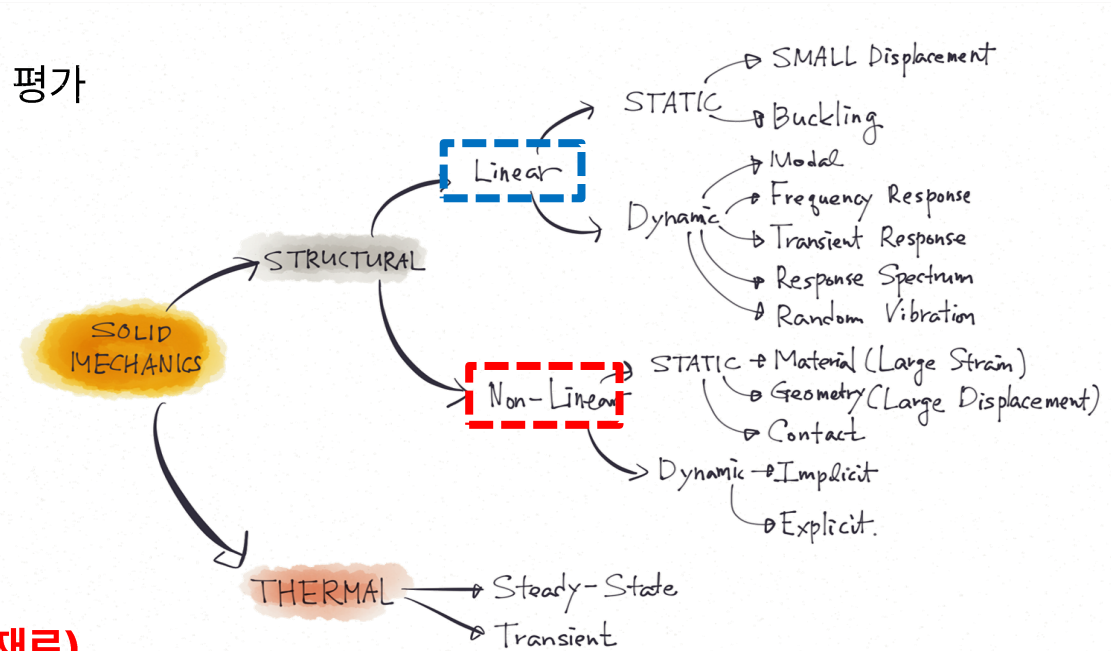
Summary

1. 선형 해석

- : 하중의 종류와는 상관없이 강성(K) 변화가 없는 상태에서의 구조 강성 평가
- : 주로, **탄성범주(항복강도 이하)** 에서의 **구조 안전성 평가** 시 사용
- : 단일 강성(K) 의 경우 하중변화에 따라 예측이 가능하므로,
대부분의 설계기준에서 해석평가를 위해 사용되고 있음

2. 비선형 해석

- : 하중의 종류와는 상관없이 강성(K) 변화 존재하는 구조 강성 평가
- : **접촉(수직 박리) 현상에 의한 응력변화나 재료 소성구간(혹은 초탄성 재료),**
대변형(ex. 고무, 처짐) 및 하중 방향 변화(회전운동) 등 특이 케이스에 대하여 해석수행
- : 강성(K) 변화 계산을 위해 다수의 해석스텝에 의한 해석시간 및 수렴성 문제 발생



CONTENTS

해석 종류 선택 방법

Part 1. 구조해석 운동방정식 이해

Part 2. 강성이란 무엇인가

Part 3. 하중에 따른 해석 분류

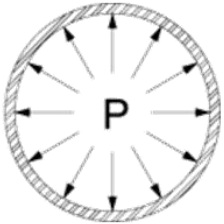
하중이란?

물체나 구조물에 가해지는 외력(外力). 이때 외력은 보통 중력이다. 공학의 한 분야인 재료역학·구조역학에서 주로 사용하는 학술어인데, 하중에 수반하는 속도에 따라 정(靜)하중, 동(動)하중으로 대별된다. Jul 8, 2019



■ 구조물의 자중

- 자중은 구조물의 무게 및 부품의 무게를 나타냄
- Dead Load : 구조물의 무게 및 부품의 무게등
기타 영구적으로 장착되는 요소재의 무게
- Live Load : 유체의 무게, 사람 하중 등 임시적으로 작용되는 무게



■ 압력 (Pressure) 하중

- 배관이나 압력 용기 내외부에 지속응력을 발생시키는 주요 요소
- 수압이나 토압, 진공하중 등도 압력하중으로 표현됨



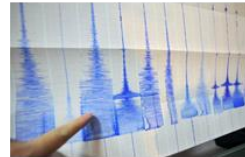
■ 온도 (Temperature) 하중

- 온도변화에 따른 구조물의 팽창, 수축을 하중으로 표현
- 온도변화에 따른 온도차를 이용하여 하중으로 적용함
- 열이 발생하는 전자장비 및 챔버 등에 주요하게 고려됨



■ 바람 (Wind)

- 수평방향의 일정한 힘에 의해 변형 유발
- 옥외에 설치되는 구조물은 일반적으로 예상되는 최대 풍속에 견딜 수 있도록 설계



■ 지진 (Seismic)

- 지반의 흔들림에 의해 구조물의 변형을 유발하는 하중
- 건축물, 교량에 일반적으로 적용되는 하중 인명 피해가 예상되는 구조물에 필수적으로 적용

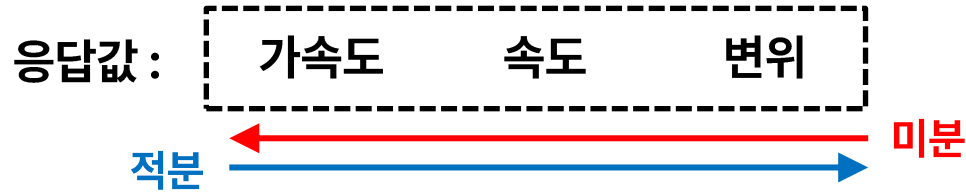


■ 진동 (Vibration), 충격 (Impact)

- 펌프, 압축기 또는 터빈과 같은 회전기로부터 전달되는 기계적 진동
- 안전밸브 또는 방출밸브의 급속한 개방으로 인한 충격진동
- 장비의 가감속에 의한 충격진동 등

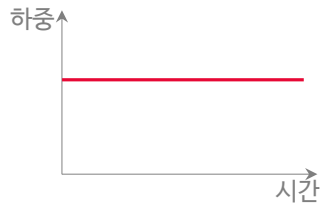
하중의 구분

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$



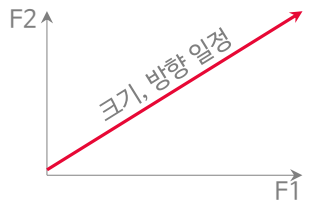
정적하중 : 시간에 따라 하중 동일 = 변위 동일

동적하중 : 시간에 따라 하중변화 = 변위변화



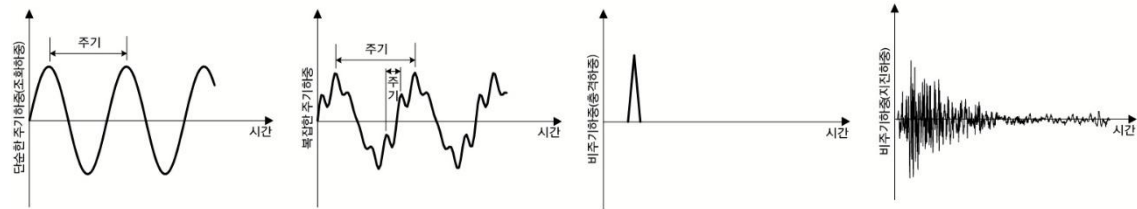
1) Constant

: 자중, 압력, 토크, 관성력 등
시간에 따라 크기와 방향이 일정한 구조하중



2) Slowly Applied Load

: 동적인 효과를 유발하지 않도록
아주 천천히 구조물에 가해지는 하중
(관성력 및 감쇠력 발생하지 않음)



하중의 구분

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$



정적하중 : 시간에 따라 하중 동일 = 변위 동일

동적하중 : 시간에 따라 하중변화 = 변위 변화

$$m\dot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

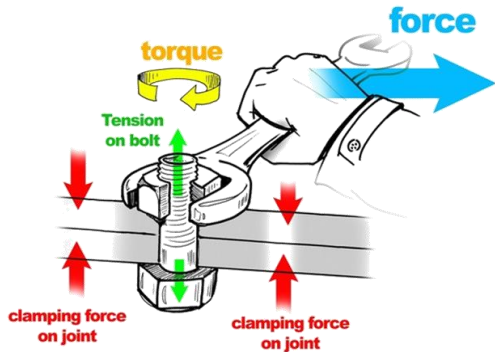
(Note: Red arrows point from '0' to the derivative terms \dot{x} and $c\dot{x}$)

- 해석시 고려해야될 변수
- : K(강성) 1개만 존재
- : 강성 관련 데이터만 필요.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

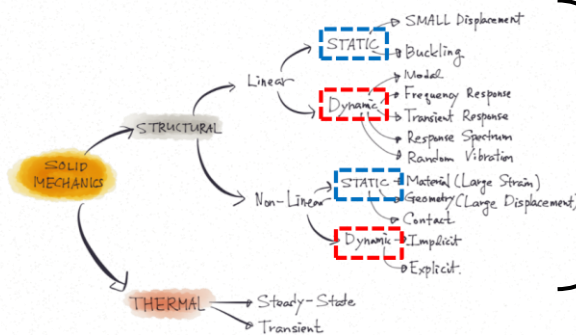
- 해석시 고려해야될 변수
- : K(강성), C(감쇠비), m(질량) 모두
- : 강성, 감쇠비, 질량 상세 데이터 필요.

하중에 따른 해석케이스 구분



물리적 현상 정의

- 해석하고자 하는 현상에 대한 정의
- 결과로 얻고자 하는 데이터 선정



해석케이스 선정

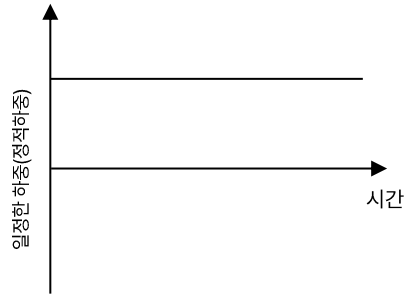
- 해석목표에 따라 해석케이스 선정

해석케이스를 구분하는 이유

- 실제 물리현상은 동시다발적으로 발생하며, 모든 조건을 구현할 수 없음.
- 구조물에 발생하는 주요 물리적 현상(하중)에 대하여 정의하며, 이에 대한 평가를 수행.
- 물리현상별 대치되는 보강방법이 다르며, 어떠한 조건에서 혹은 어떤 방향으로 영향이 큰지 알아야만 목적에 맞는 설계 가능함.

→ 해석 목적에 따라 해석케이스 구분.

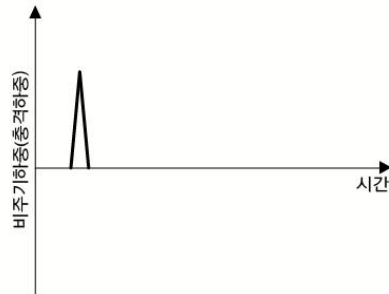
하중에 따른 해석케이스 구분 - 선형해석



선형정적해석

- 외력(구조하중)에 대한 구조안전성 평가
- 최대 발생 변형 및 응력 결과 확인

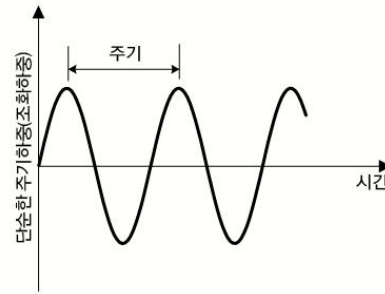
구조강성 평가



과도응답해석

- 충격 해석
- 비선형성을 고려한 동해석
- 시간에 따른 하중 및 경계조건 입력
- 시간에 따른 응답 확인

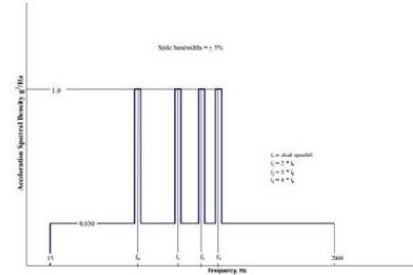
관성진동 영향 평가



주파수응답해석

- 조화하중 가진시 주파수에 따른 응답 특성 분석
- 주파수별 정상상태 응답
- Sine curve 형태의 조화 하중 입력
- 주파수별 조화응답 확인

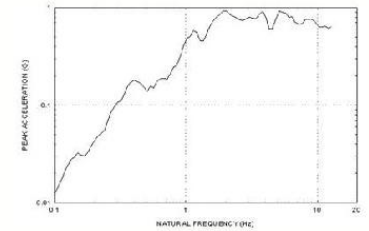
제품 내구성 평가
(일정한 반복하중)



랜덤진동해석

- 확률과 통계이론을 이용하여 어떤 범위 내에 있을 진동을 예측
- 가진 방향으로 다양한 주파수 영역에 대한 확률론적 스펙트럼 크기 입력
- 확률로 지정된 범위 내에서 응답 확인

제품 내구성 평가
(확률적인 반복하중)



응답스펙트럼해석

- 지진하중에 대한 내진해석
- 가진 방향으로 다양한 주파수 영역의 스펙트럼 응답 크기를 입력
- 모드별 응답을 조합하여 산정된 최대 응답 확인

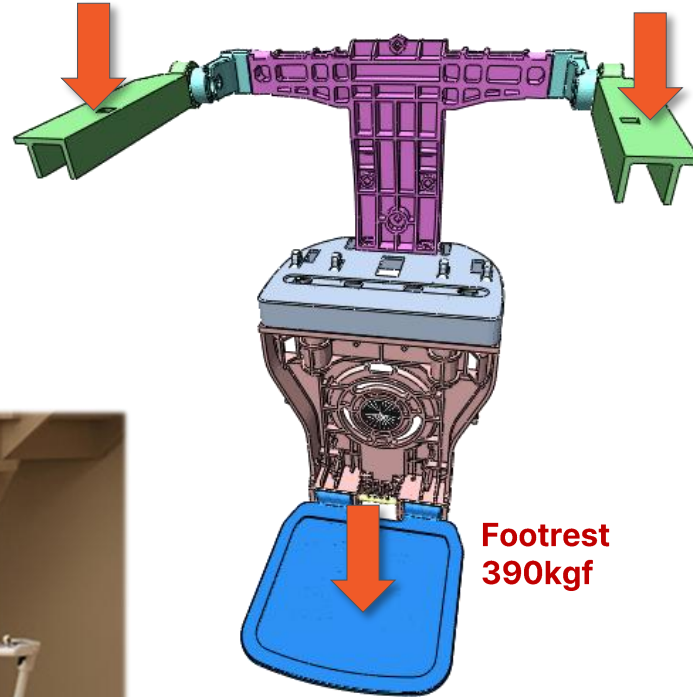
지진 안전성 평가

선형정적해석 예시 : Lifting Chair 구조 강건성 평가



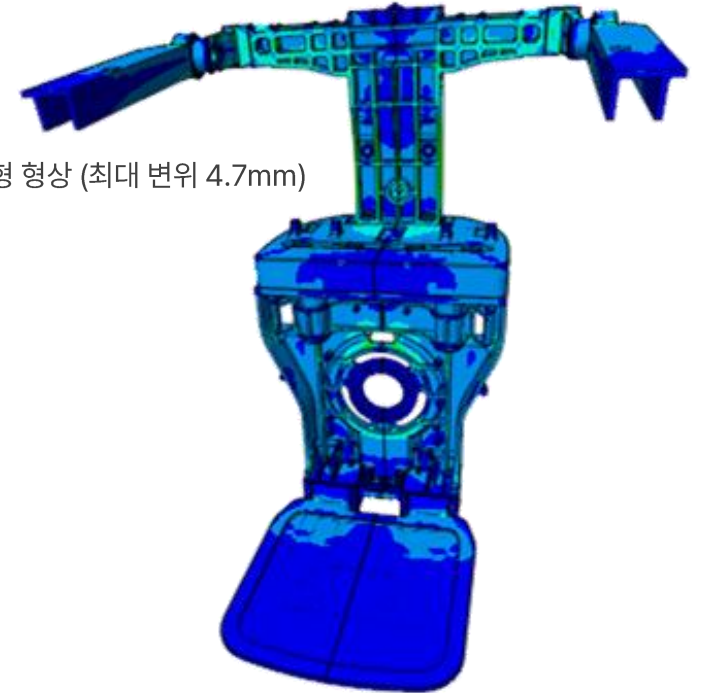
Armrest 65kgf

Armrest 65kgf



Footrest
390kgf

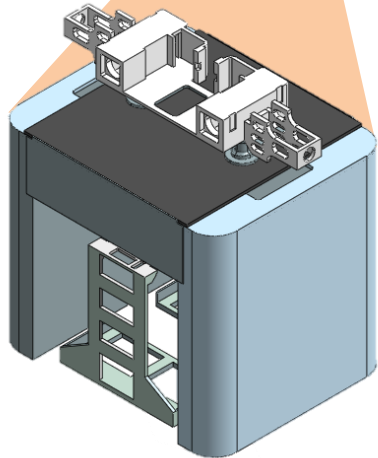
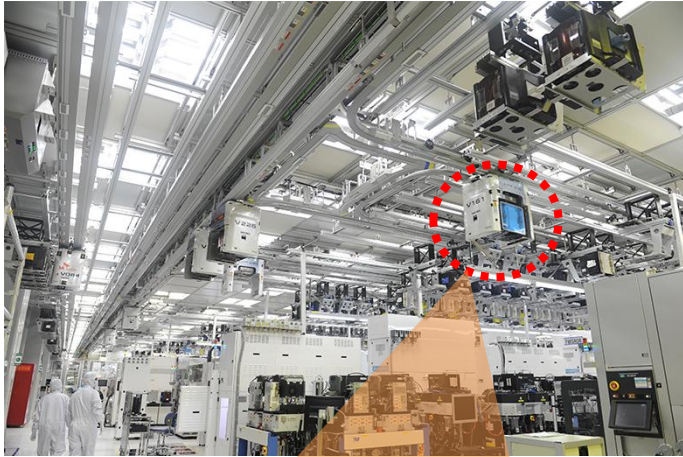
Von Mises 응력분포 (최대 65MPa)



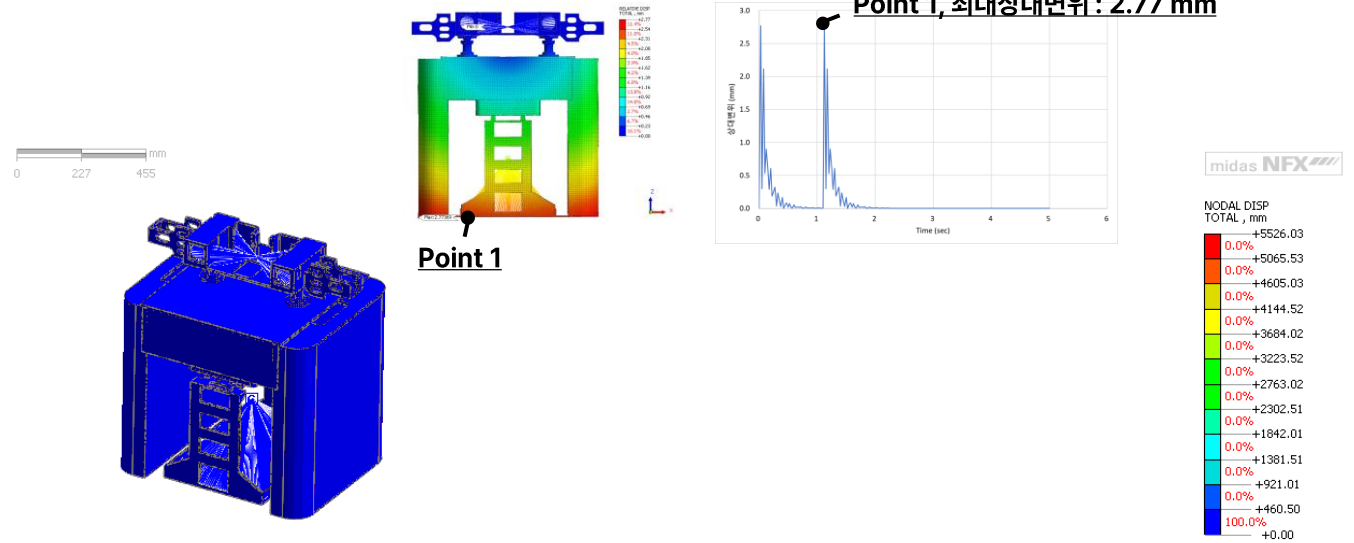
변형 형상 (최대 변위 4.7mm)

최대 변위와 최대응력이
허용범위를 초과하지 않음

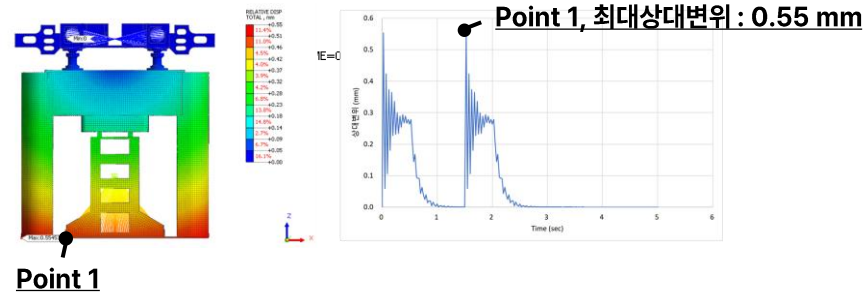
과도응답해석 예시 : OHT 이송장비 진동검토



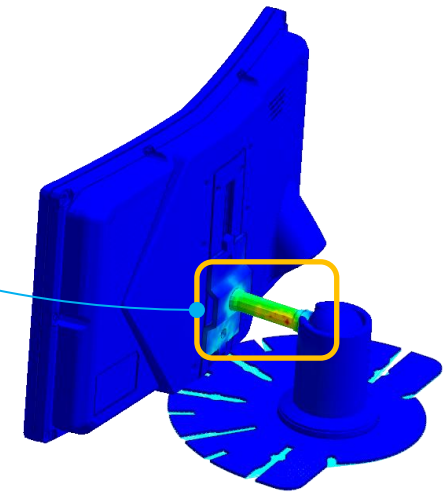
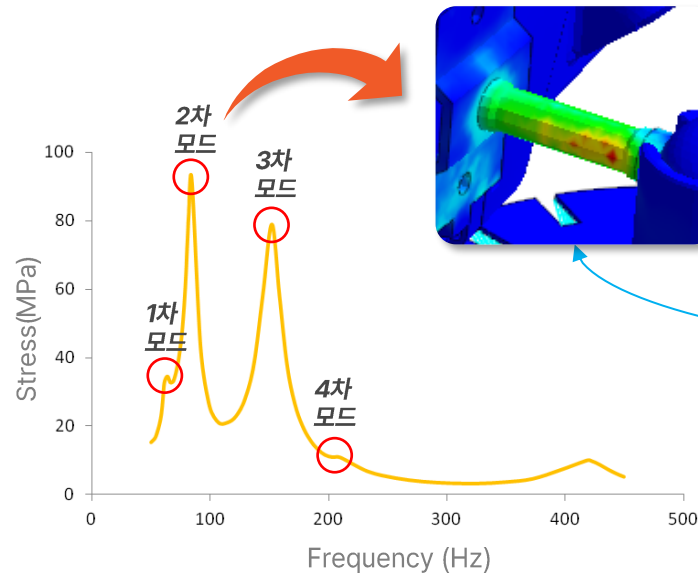
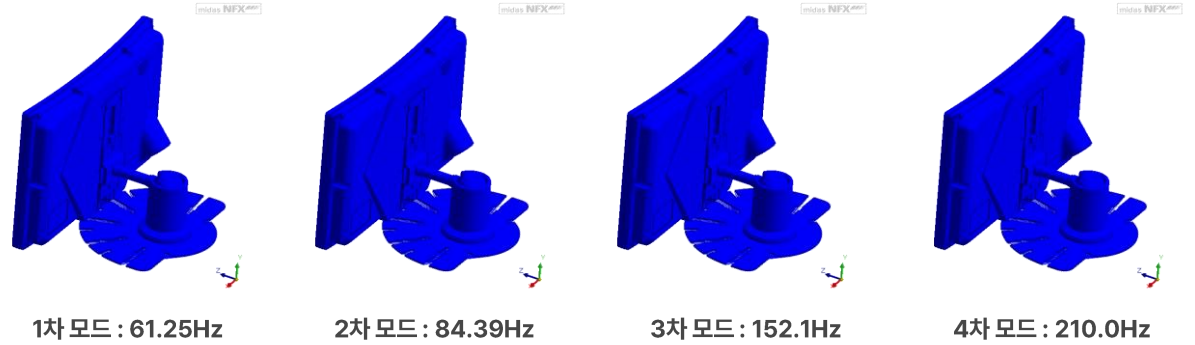
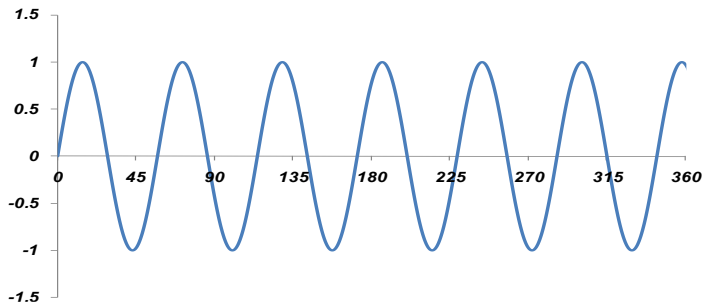
Case 1 : 가/감속도 : $\pm 50 \text{ m/s}^2$, 운행속도 : 5 m/s



Case 2 : 가/감속도 : $\pm 10 \text{ m/s}^2$, 운행속도 : 5 m/s



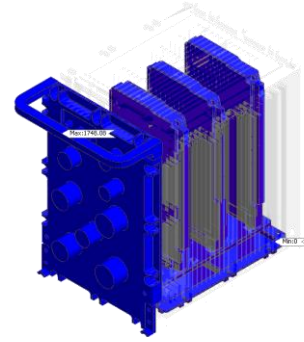
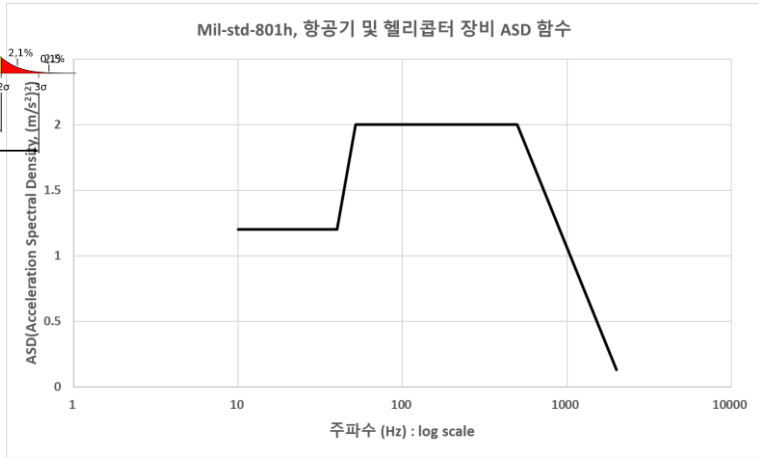
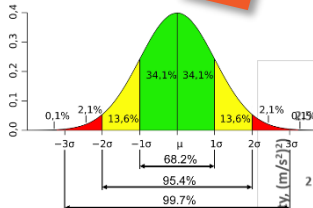
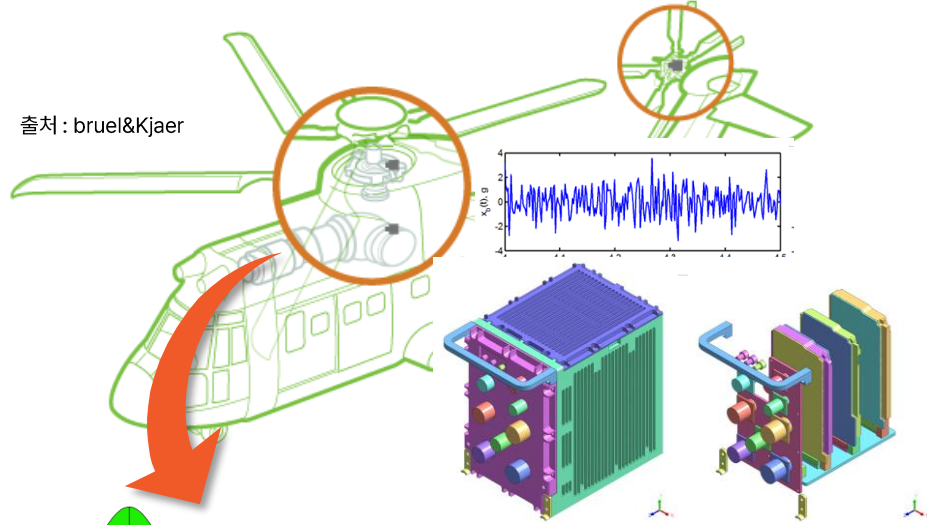
주파수응답해석 예시 : 모니터 공진 안전성 검토



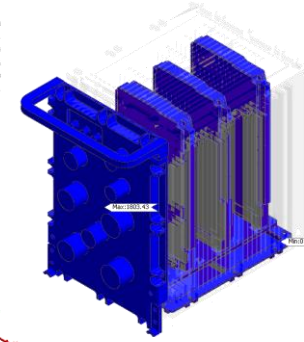
3축 진동 해석 결과(Stress)

랜덤진동해석 예시 : HUMS 진동 내구성 평가

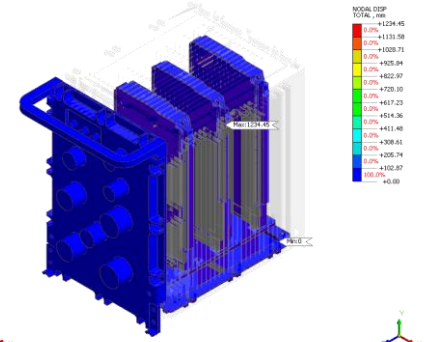
출처 : bruel&kjaer



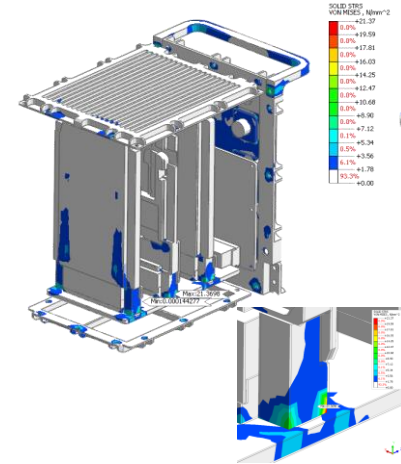
[고유진동수 - X 방향]



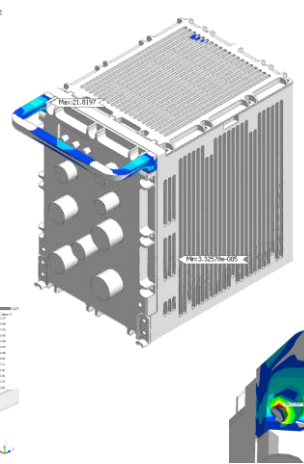
[고유진동수 - Y 방향]



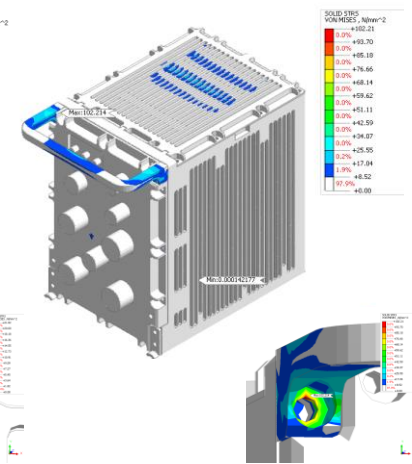
[고유진동수 - Z 방향]



[RMS 응력결과 - X 방향]

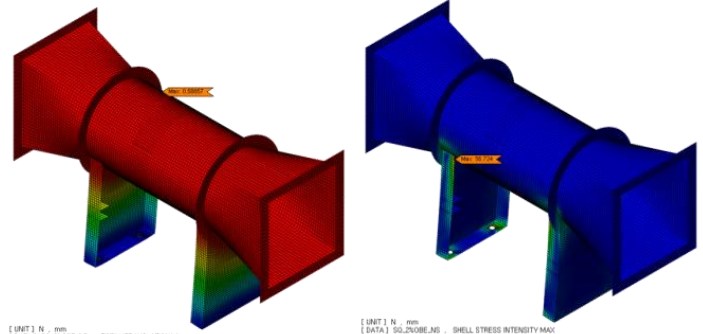
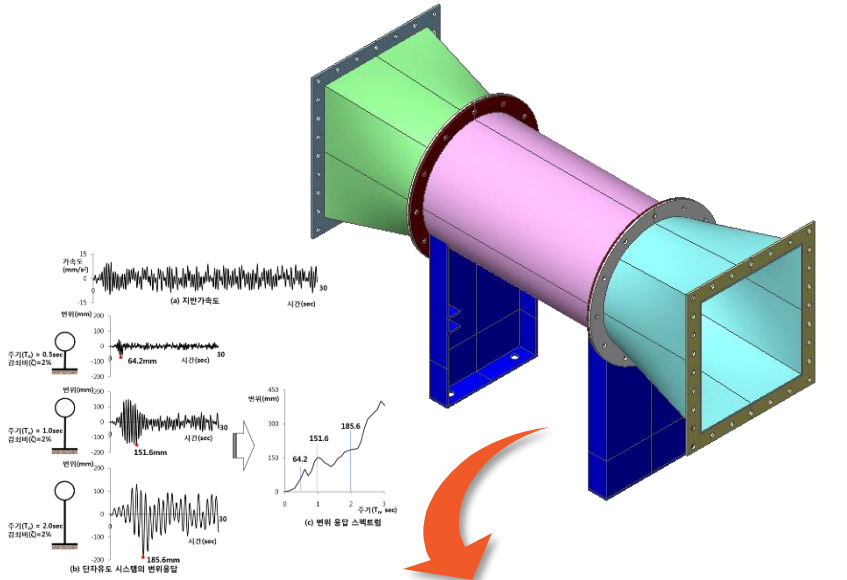


[RMS 응력결과 - Y 방향]

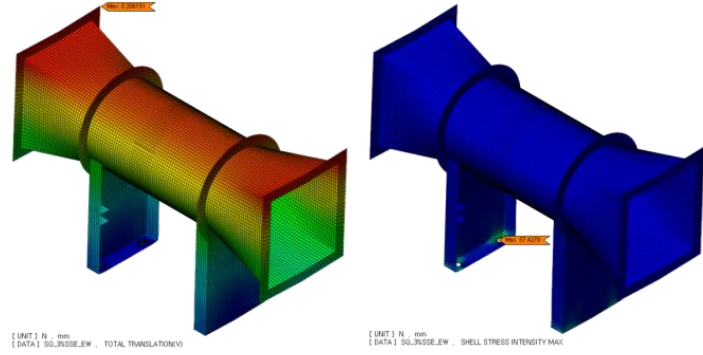


[RMS 응력결과 - Z 방향]

응답스펙트럼해석 예시 : 원전기기 검사기 내진안전성 검토



< Max. Displacement & Stress of OBE@NS >



< Max. Displacement & Stress of SSE@EW >

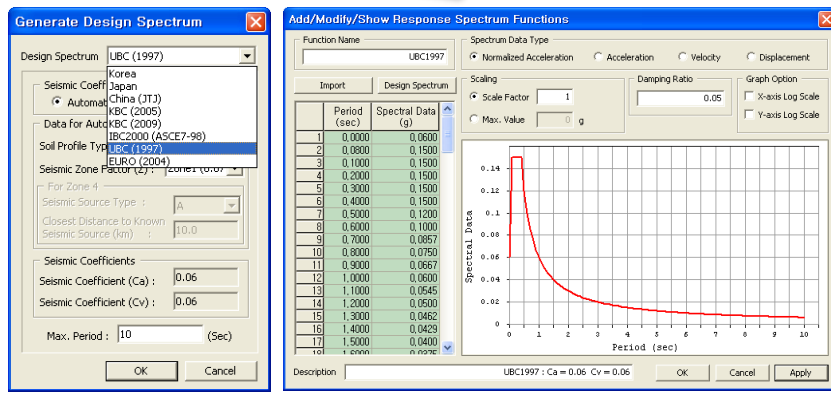


TABLE I - STRESS LIMITS FOR EQUIPMENT & SUPPORTS
(EXCLUDING ITEMS ASSOCIATED WITH BUILDING STRUCTURE - REFER TO SKETCH 1)

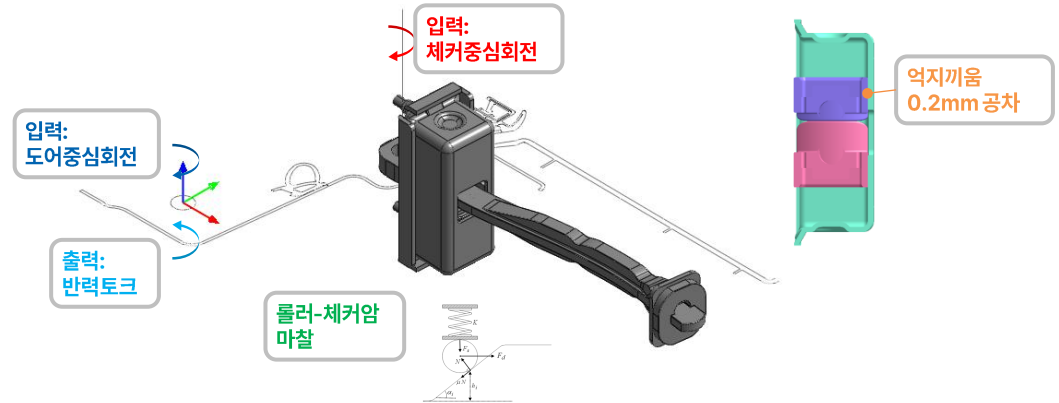
Plant Operating Condition	Loading Combination	Stress Value	Allowable Stress
Service Limit B (Upset)	DWO + OBE	138.7MPa	150.0MPa (0.6*Sy ^③)
Service Limit D (Emergency /Failed)	DWO + SSE	229.4MPa	237.5MPa (0.95*Sy ^④)

Plant Operating Condition	Loading Combination	Stress Value	Allowable Stress
Service Limit A (Normal)	DWO	48.1MPa	150.0MPa (0.6*Sy ^②)
Service Limit B (Upset)	DWO + OBE	138.7MPa	150.0MPa (0.6*Sy ^③)
Service Limit D (Emergency /Failed)	DWO + SSE	229.4MPa	237.5MPa (0.95*Sy ^④)

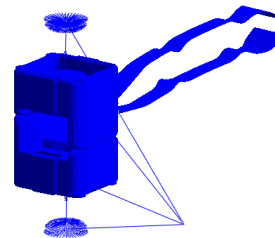
NOTE
 Sy^① : Yield strength(ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II , Part D)
 0.6*Sy^② : AISC Code, 1980, Section 1.5.1.1(Page 5-40)
 0.6*Sy^③ : AISC Code, 1980, Section 1.5.6(Page 5-30)
 0.95*Sy^④ : These values are 1.6 times higher than Service A limits,

not to exceed 0.95*Sy

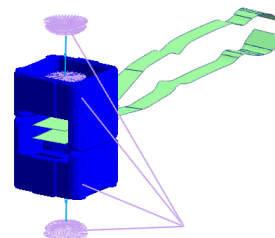
비선형정적해석 예시 : Car Door Checker 구조안전성 검토



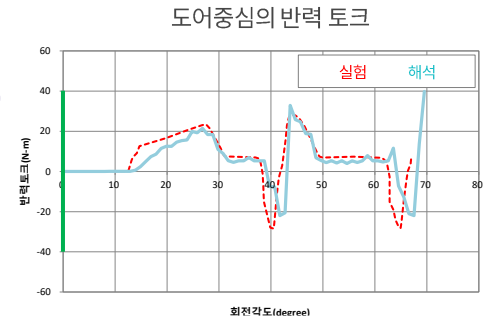
변위



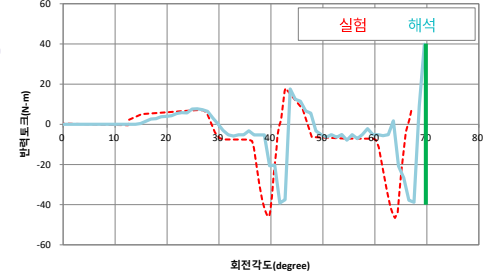
이력



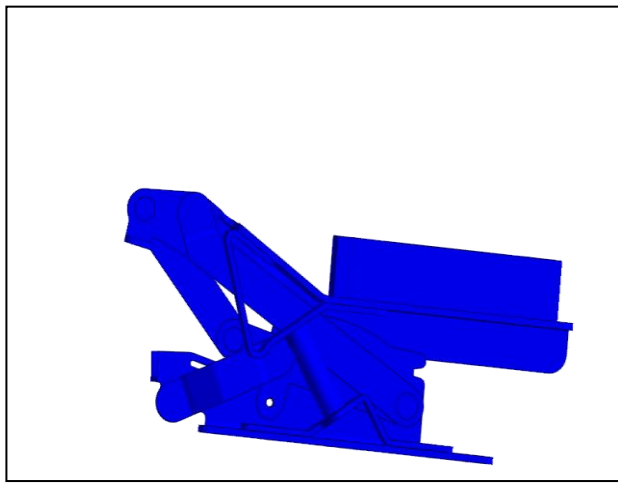
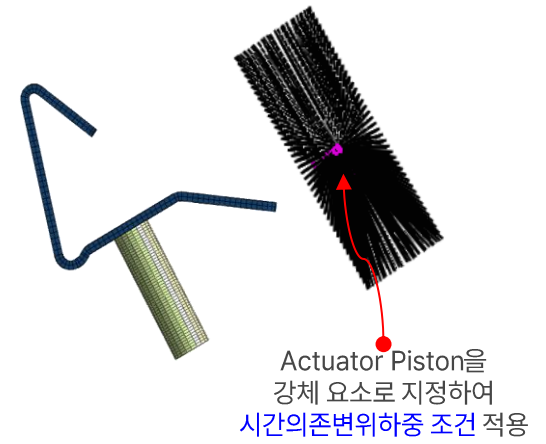
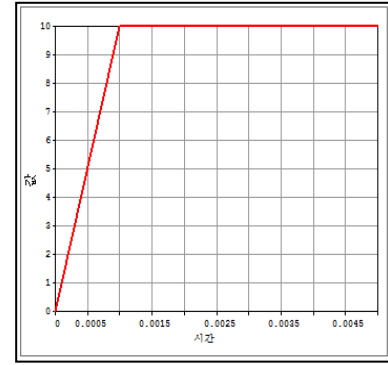
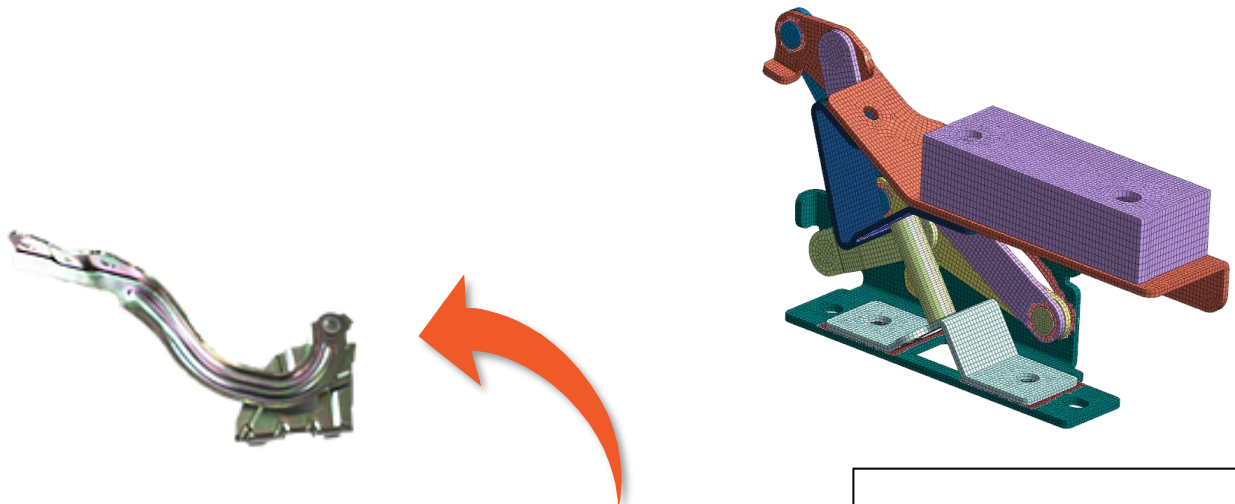
전진



복귀



비선형동해석 예시 : Active Hood Hinge 작동시 변형해석



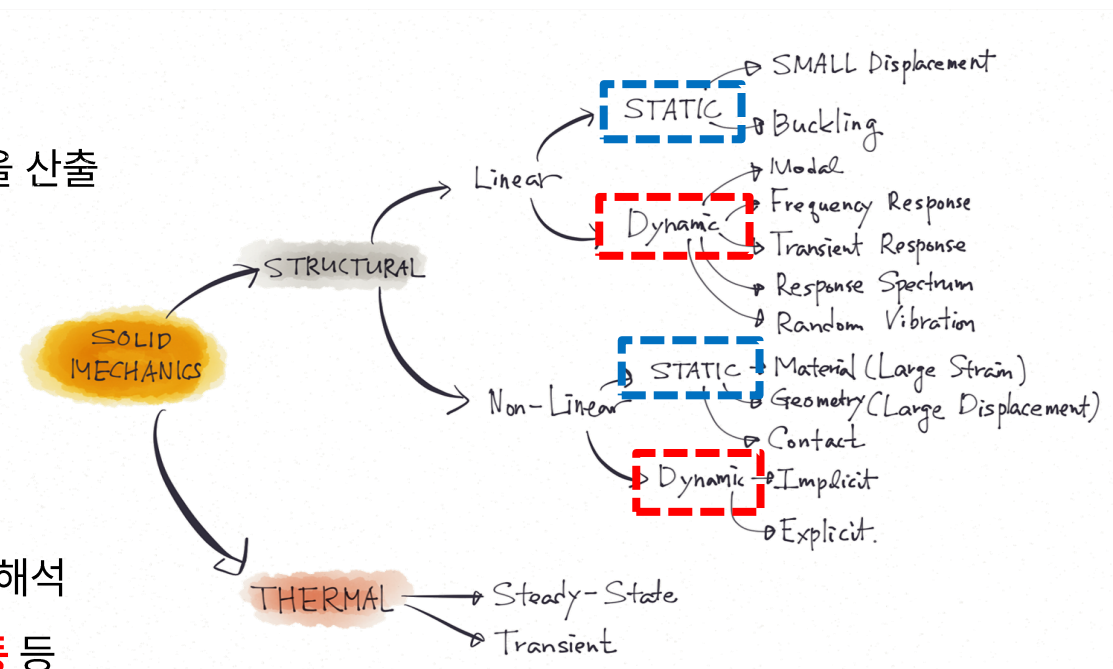
Summary

1. 정적(Static) 해석

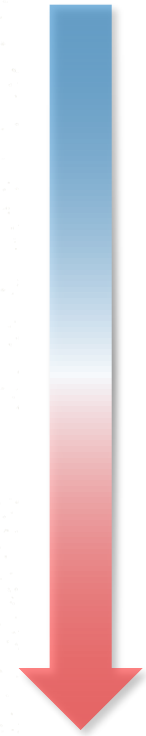
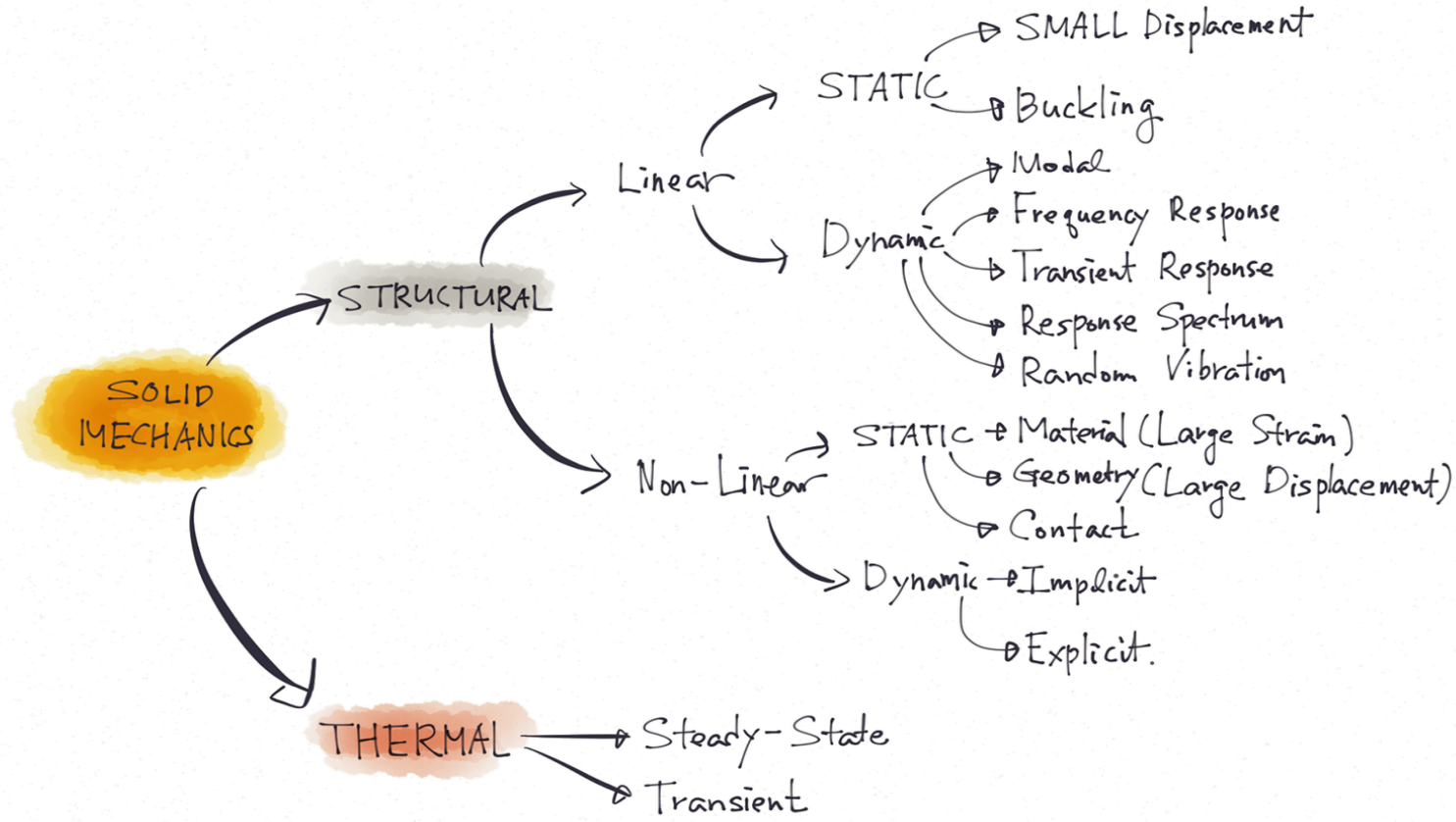
- : 시간에 따라 하중의 크기 및 방향이 일정한 현상에 대한 해석
- : **진동의 영향이 없는 상태에서 구조체의 평형이 된 상태에서의 응답값**을 산출
- : **자중, 구조물 내부압력, 적설하중, 풍하중, 적재하중, 열 팽창** 등 변화가 적은 하중에 대한 **구조물의 강건성 평가**에 사용됨

2. 동적(Dynamic) 해석

- : 시간에 따라 주기적 혹은 비주기적으로 하중이 변화하는 현상에 대한 해석
- : **지진, 충격, 물체 이송, 모터의 주기적 진동, 비행기 내부 무작위적 진동** 등 시간에 따라 변화가 큰 하중에 대한 **구조물의 강건성 평가**에 사용됨
- : 해석케이스에 따라 **관성 진동의 영향 검토, 제품 내구성 검토, 지진 안전성 검토** 등 **적용 동하중에 매칭되는 해석 주 관심대상이 존재함.**



해석케이스 분류



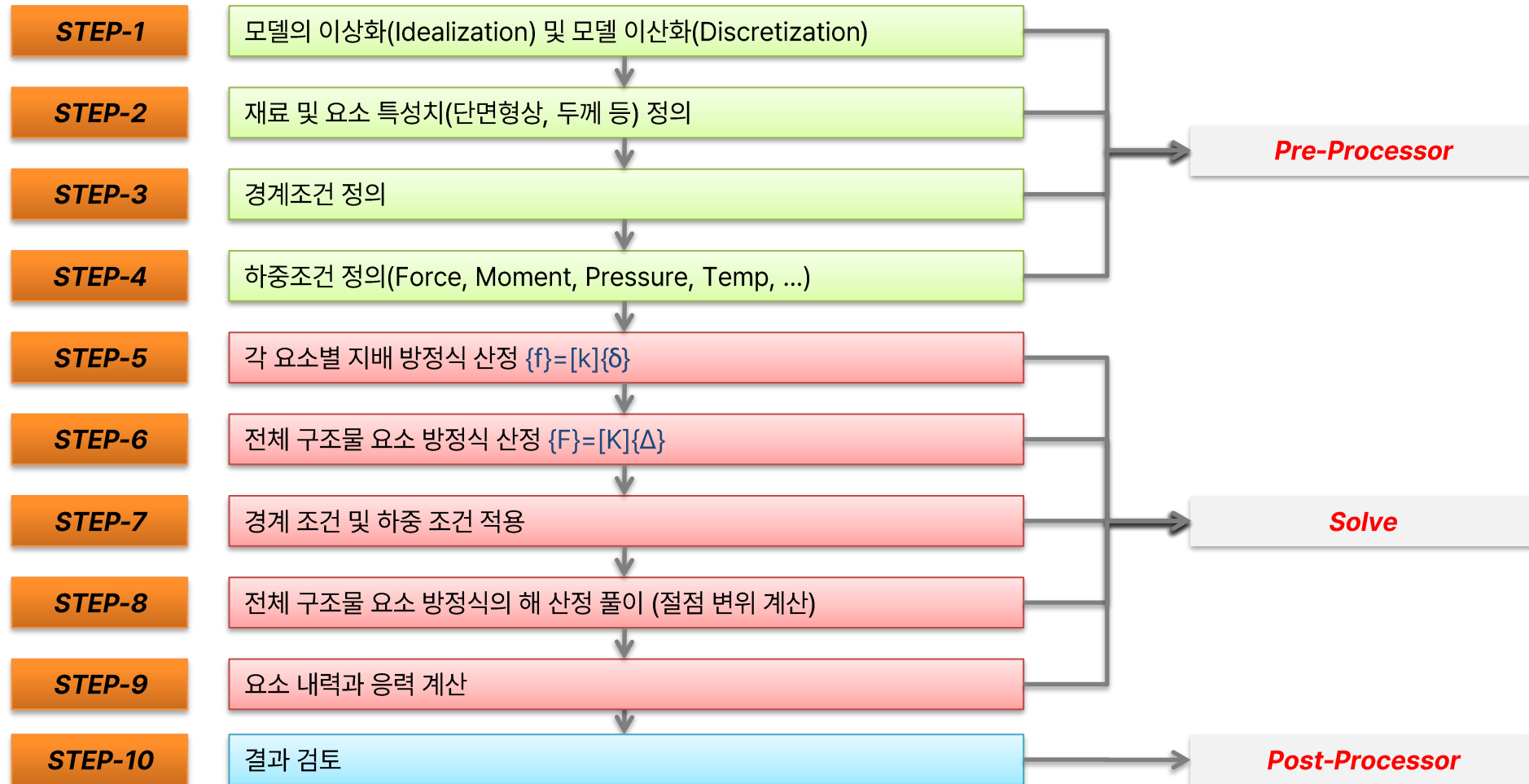
✓ 가정된 상황에서 보수적 평가

- : 해석적 난이도 및 시간 감소
- : 적은 입력 데이터 요구
- : 목적에 따라 정형화된 프로세스로 빠르고 효율적인 결과 산출

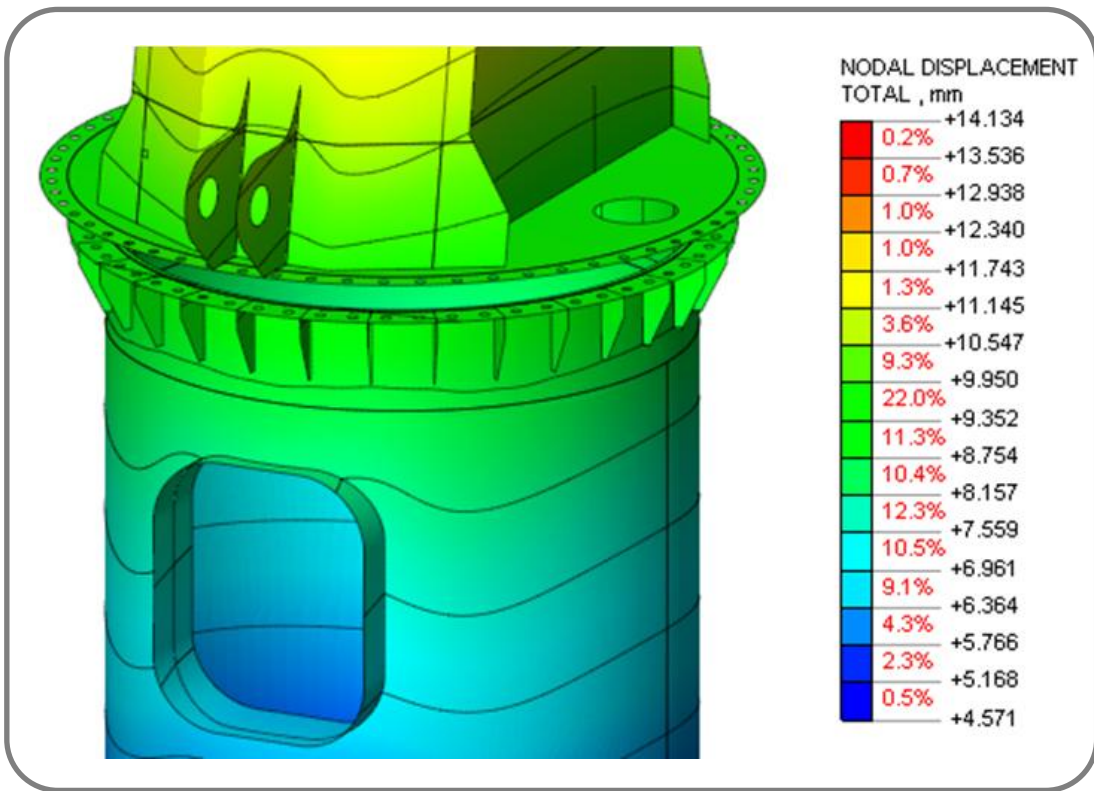
✓ 실제와 유사한 상세적 평가

- : 해석적 난이도 및 시간 증가
- : 많은 조건 데이터 및 검증자료 요구
- : 비정형화된 프로세스로 엔지니어 경험이 매우 중요

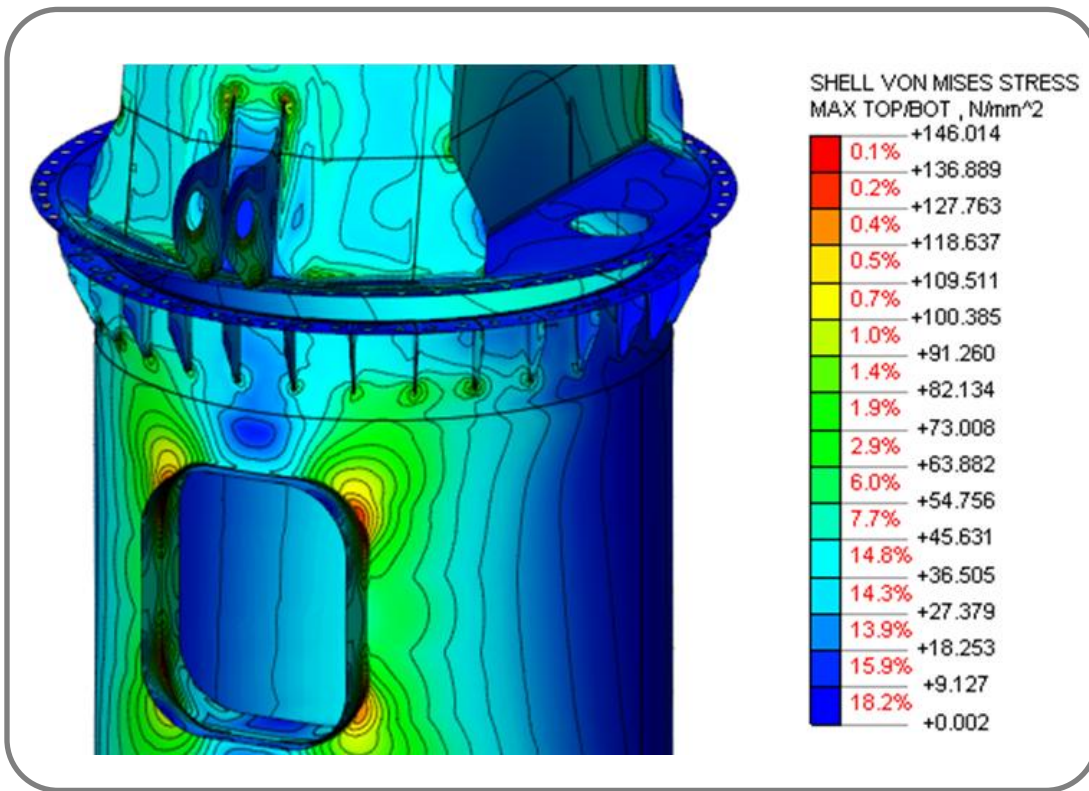
구조해석 프로세스



해석결과 - 1차 거동과 2차 거동



1차 거동 : 변형형상



2차 거동 : 응력분포

사전 질문 사항

- 해석이 정상적으로 완료되었는가?
- 조건에 맞게 **적절한 변형의 방향과 크기**가 발생하고 있는가?
- 어떤 항목으로 **구조물의 안전성을 평가**할 수 있을까?
- 구조안정성 평가를 위한 **설계 기준**이 무엇인가? (안전율, KDS, ASME...)
- **재료 특징에 따라 구조검토**가 적절히 수행되었는가? (연성, 취성...)
- **구조 위치별 평가**가 적절히 수행되었는가? (연결볼트, 앵커볼트, Support...)

Thank you

3강

해석 결과 활용 방법



CONTENTS

해석 결과 활용 방법

Part 1. 변위와 응력에 대한 이해

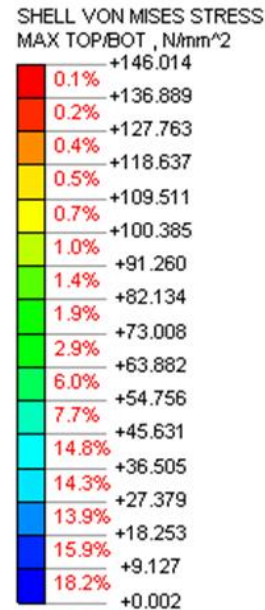
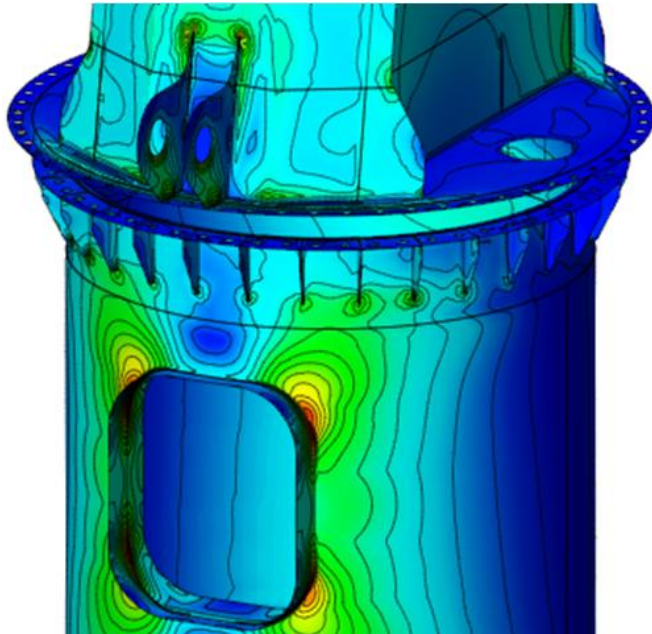
Part 2. 재료별 파손이론 및 응력에 대한 이해

Part 3. 해석결과 후처리과정 고려사항



무슨 결과들을 보고 계신가요?

어떤 해석결과를 봐야 할까?



Total translation

Reaction force

Tensile stress

Safety factor

XX-direction stress

Principal stress

Percent total energy

Acceleration

Von-mises stress

XY Shear stress

Tresca effective stress

Relative displacement

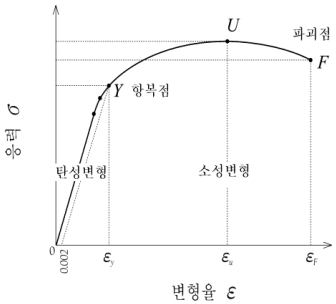
Velocity

어떤 해석결과를 봐야 할까?

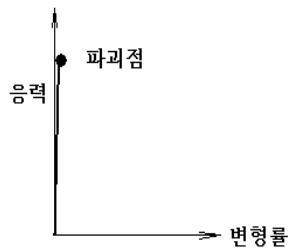


구조 파괴모드 구분

연성재료(Ductile material) 파괴



취성재료(Brittle material) 파괴



파괴모드



구조해석 결과의 판단 및 평가

- 1차 응답값인 변형의 방향과 크기에 대한 유효성 확인이 필요함.
- 일반적으로 구조설계의 관심은 항복(Yielding)의 발생여부임.
- 재료의 특성에 따라 응력을 환산/판단하는 파손이론(Failure Theory)이 존재하고, 이 조건에 따라 환산된 응력을 유효응력(Effective Stress)라고 함.
- 비정상적인 하중이나 제작오차, 설치오차 등의 사항들을 고려하여 설계단계에서는 구조적 마진율에 해당하는 안전계수(Safety Factor)를 반영함.
- 제품, 분야, 하중 등에 따라 요구되는 설계기준(Design Standard)가 존재하며, 구조물, 지지부, 볼트 등 위치에 따라 상세적용이 필요.

CONTENTS

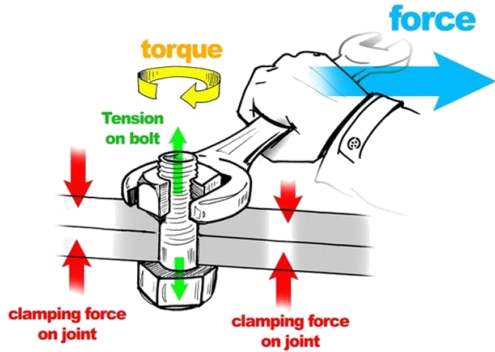
해석 결과 활용 방법

Part 1. 변위와 응력에 대한 이해

Part 2. 재료별 파손이론 및 응력에 대한 이해

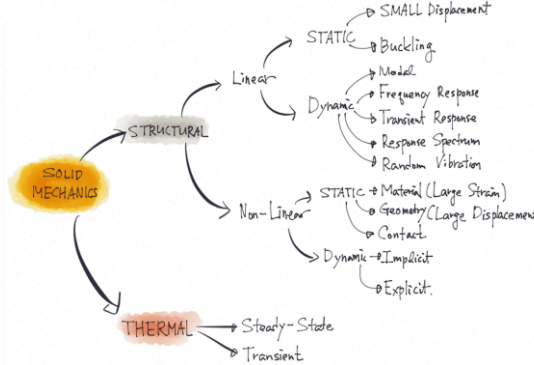
Part 3. 해석결과 후처리과정 고려사항

구조해석의 흐름



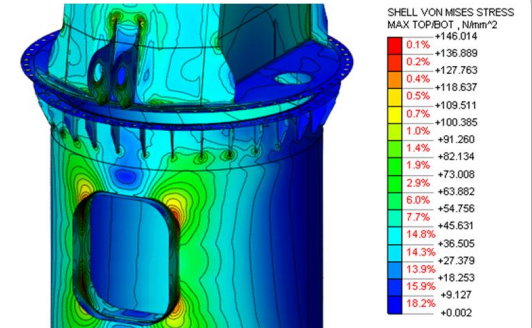
물리적 현상 정의

- 해석하고자 하는 현상에 대한 정의
- 결과로 얻고자 하는 데이터 선정



해석케이스 선정

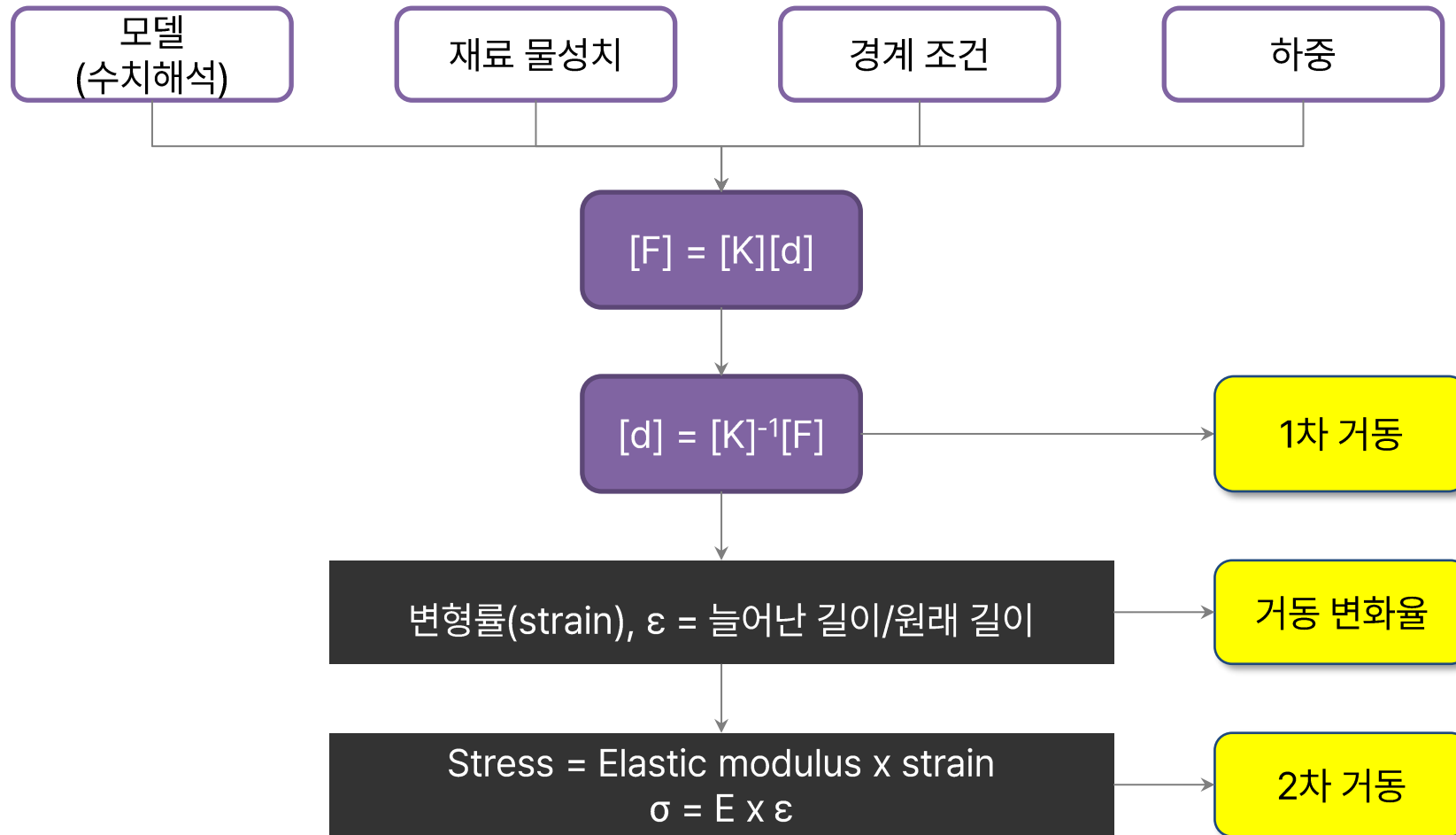
- 해석목표에 따라 해석케이스 선정
- 해석별 필요한 데이터 확인



해석 결과 분석

- 구조물의 안전성 여부 확인
- 재료/파트 별 구조검토 항목 확인
- 평가를 위한 설계기준 적용

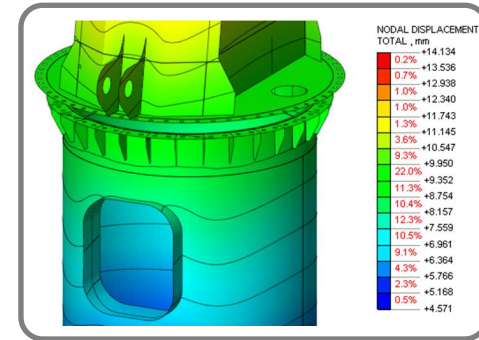
구조해석 결과 출력 흐름



구조해석 결과 구분

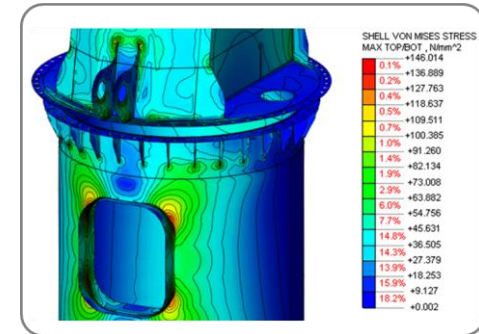
1차 거동 : 변형 형상

- 유한요소 행렬방정식으로부터 직접 계산되는 절점 자유도(nodal DOF) 를 말하며 상태변수 (state variable)라고도 불림
- 구조물의 변위, 온도, 유동의 속도 등이 1차 거동의 대표적인 예임



2차 거동 : 응력 분포

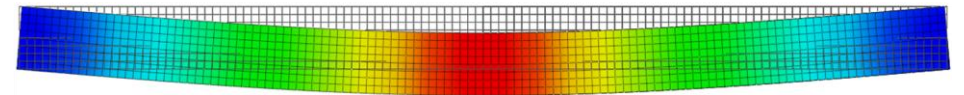
- 물체의 1차 거동과는 달리 유한요소 행렬방정식으로부터 직접 계산되지 않고, 1차 거동의 공간상의 변화율 과 구성방정식(constitute relation)을 이용한 후처리 작업으로 계산
- 대표적인 예로 응력과 열유속(heat flux)을 들 수 있음



거동의 변화율 : 반력, 변형률, 방향

- 1, 2차 거동의 위치 그리고 시간에 따른 변화율을 의미
- 1차 거동의 공간상의 변화율로 변형률과 온도구배를 들 수 있음
- 시간에 따른 변화율로는 속도를 예로 들 수 있음.

Non-Linear Static Analysis (Actual Deform)



Linear Static Analysis (Actual Deform)



변위(Displacement)란 무엇인가?

변위(영어: displacement)는 물리학에서 나중 위치의 값에서 처음 위치의 값을 뺀 벡터량 즉, 한 점의 최종 위치와 처음 위치(예: 움직이는 물체의 질량 중심) 간의 차이이다. 단위는 m(미터)로 나타내며 최종 위치에 도달하는 실제 경로와는 관계가 없다. "두 점 사이의 최단 거리"로 정의할 수 있다.

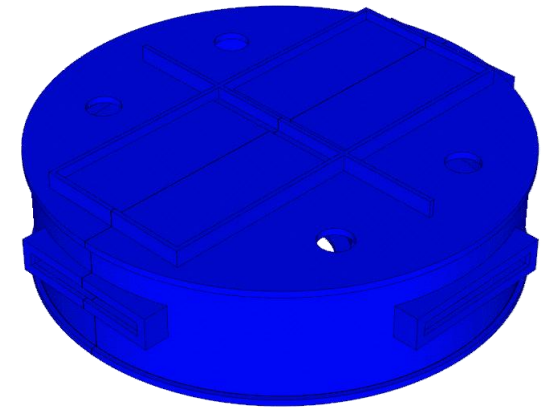
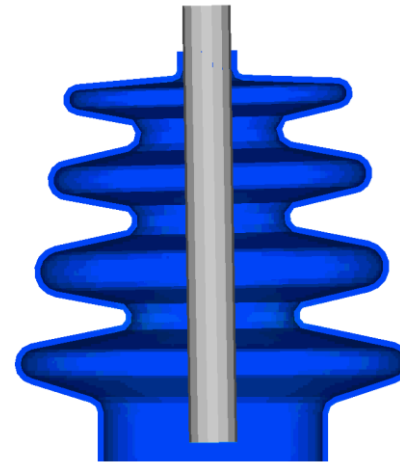
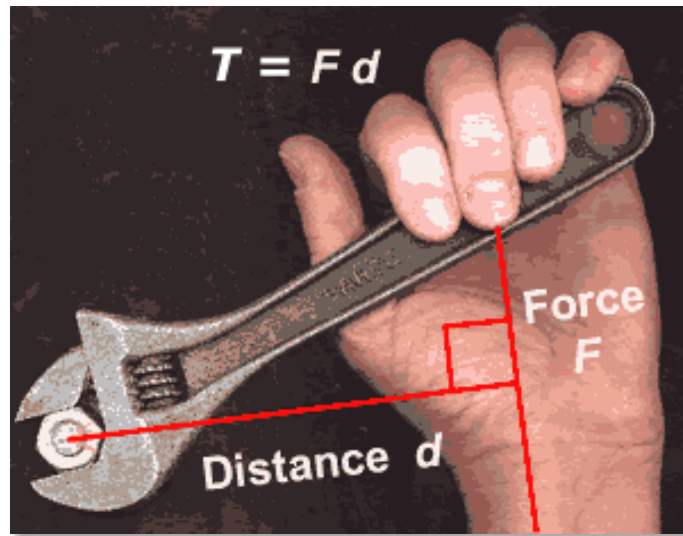
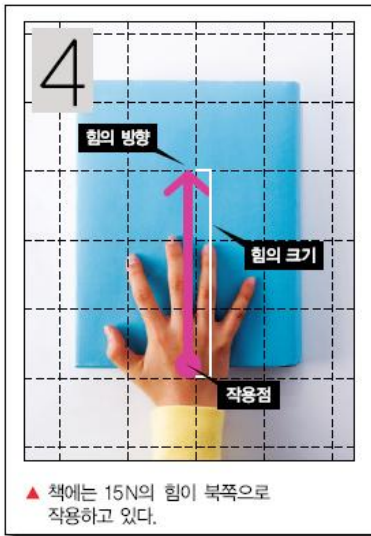
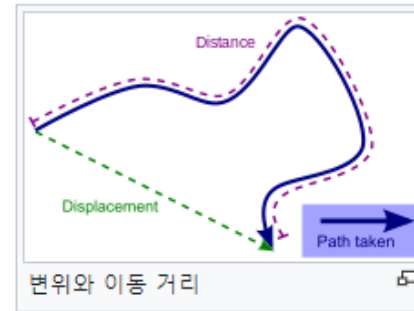
변위 값이 양이면 운동 방향이 양의 방향임을 나타내고 변위 값이 음이면 운동 방향이 음의 방향임을 나타낸다.

종류 [편집]

변위는 방향과 크기를 갖는 벡터량이다.

Keyword 1 : 방향

Keyword 2 : 크기



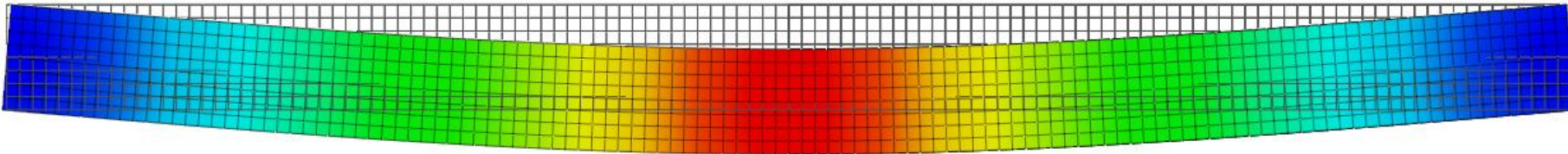
변위(Displacement)결과 평가

1) 적절한 방향과 크기로 변형이 발생했는가?

Keyword 1 : 방향 (Direction)

Keyword 2 : 크기 (Value)

Non-Linear Static Analysis (Actual Deform)



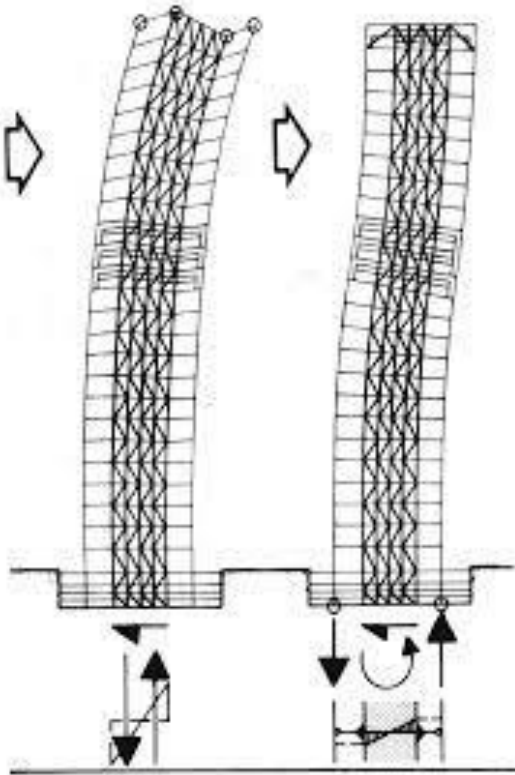
Linear Static Analysis (Actual Deform)



Q. 해석조건과 해석타입에 맞는 적절한 변위의 방향과 크기를 가지는가??

변위(Displacement)결과 평가

2) 요구하는 기준을 만족하고 있는가?



변위(Displacement)기준 평가

2) 요구하는 기준을 만족하고 있는가?

랙 구조물 내진시험규격 (안전성)
: 랙 상단 프레임 50mm 변위제한

JISC 6011-2 : 내진 시험 규격(주요 부분만 설명)

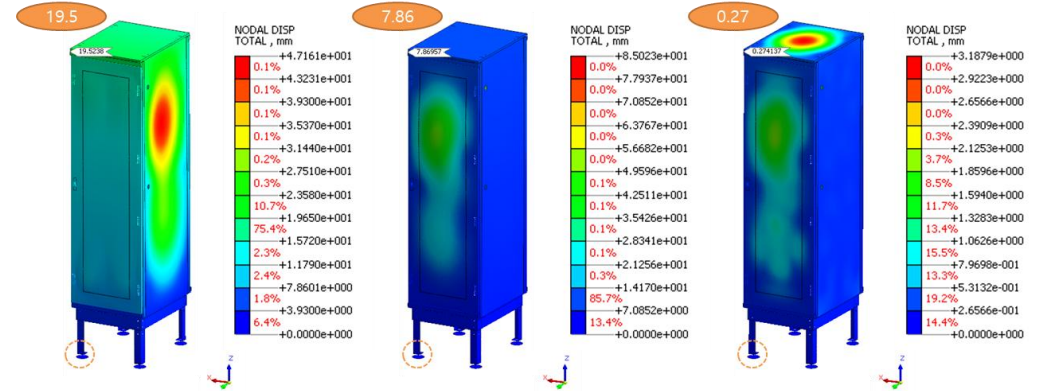
• 해석 조건

- ① 내진 시험의 **가진 조건은 1축 가진**으로 정하며 합성 파형 A 또는 B와 동등해야 한다.
시험은 파형 A 또는 B, 두 개의 파형 중 선택하는데, 이것은 다른 지진 지역에서 적절하게 사용할 수 있는 캐비닛 또는 랙을 경제적으로 제조할 수 있게 하기 위해서이다.
- ② 내진 해석은 파형 A와 B에 대응하는 **요구 응답 스펙트럼(RRS: required response spectrum)**을 사용하여 각각의 경우에 대하여 **최대 변위와 최대 응력을 계산**한다.

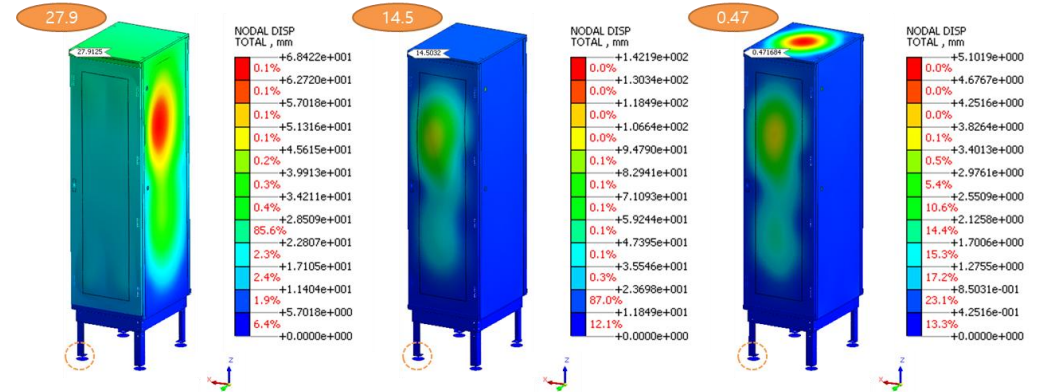
• 결과 분석 기준

- ① 내진 시험을 하는 동안 **랙 상부의 최대 변위를 측정하며 프레임 정점의 최대 변위는 50 mm 이하**이어야 하며 구성품의 파손이 없어야 한다.
- ② **영구적인 구조 파괴는 있어서는 안된다.** 영구적인 구조 파괴란, 시험을 한 캐비닛 또는 랙 안의 질량을 지지하는 부품의 변형, 또는 접속부의 파괴로 한다. 영구적인 구조 파괴의 대표적인 예로는, 부착 치주의 구부러짐 또는 뒤틀림, 기반의 변형, 금, 및 고정 볼트 또는 고정 부품의 파손이 있다.

A 파형 응답 결과



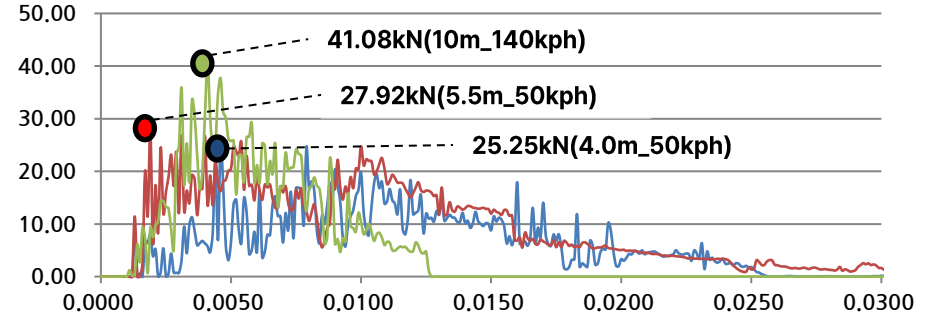
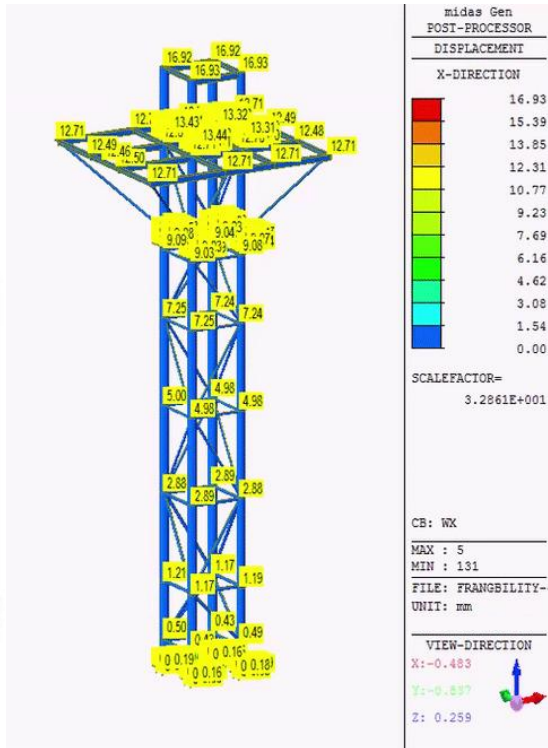
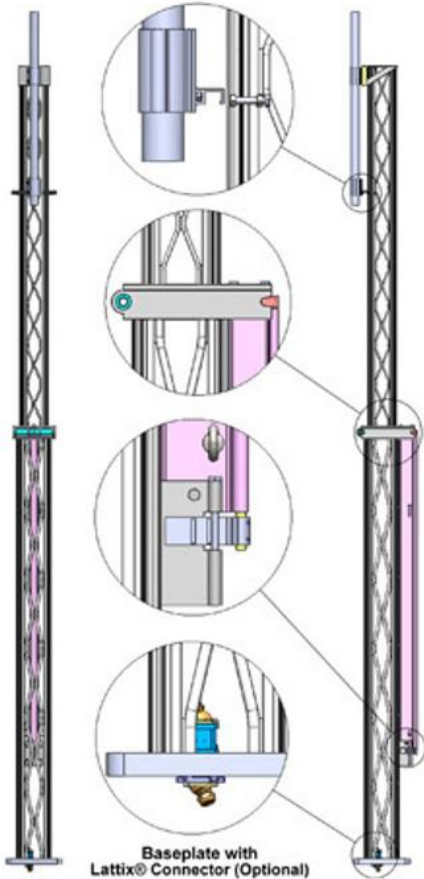
B 파형 응답 결과



변위(Displacement)기준 평가

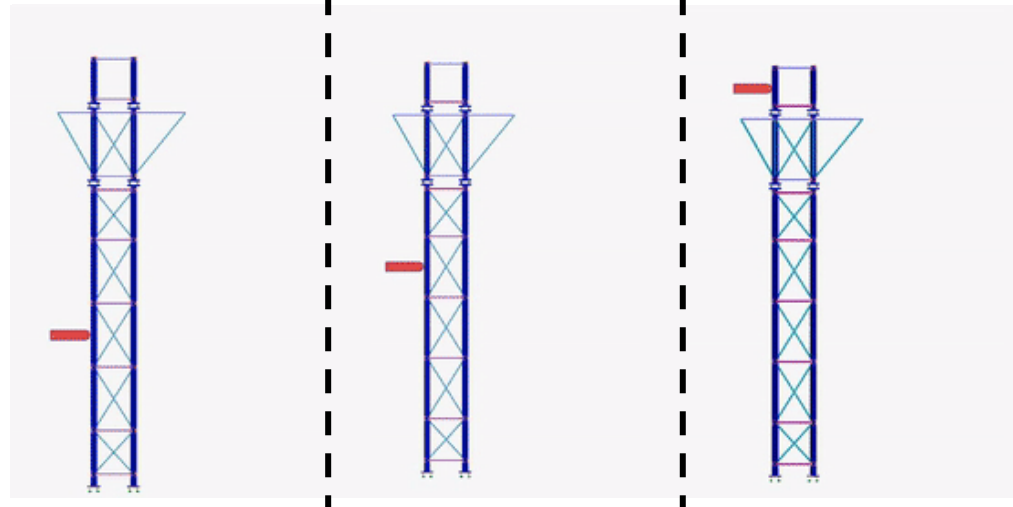
2) 요구하는 기준을 만족하고 있는가?

**EO sensor 설계기준 (정밀도)
: 20mm 변위제한**



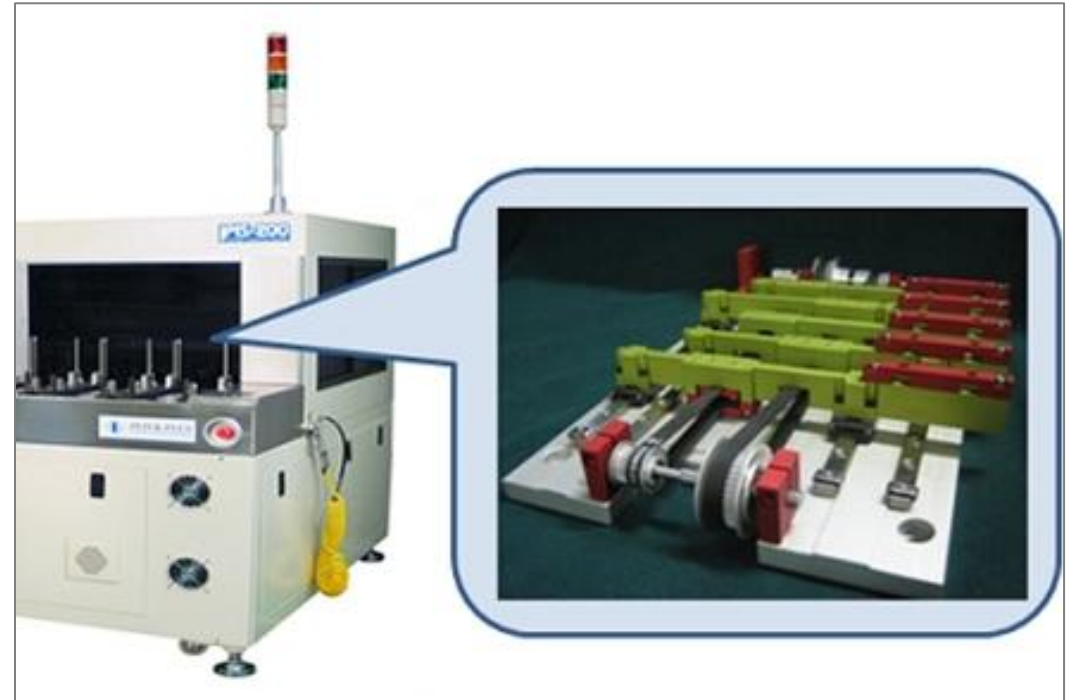
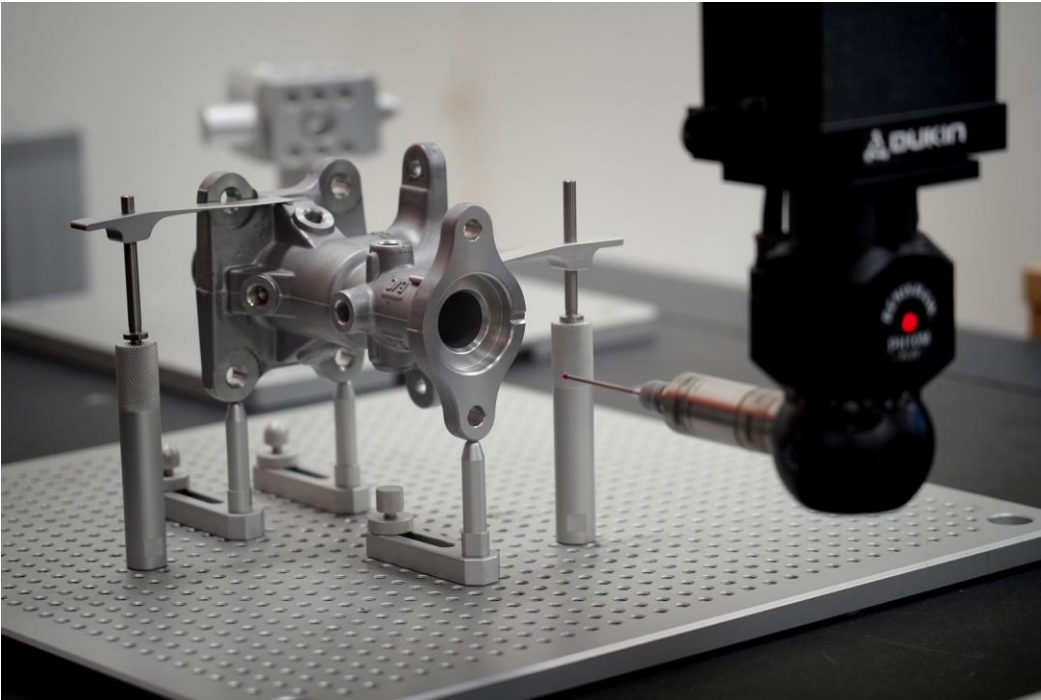
비행기 날개 충돌 후 파손된 플랫폼이 진로를 방해하지 않는가? (안전성)

4.0m 충돌시 (50kph) 5.5m 충돌시 (50kph) 10m 충돌시 (140kph)



변위(Displacement)기준 평가

2) 요구하는 기준을 만족하고 있는가?

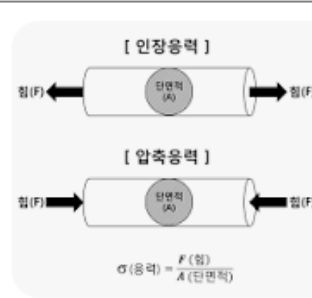


응력(Stress)이란 무엇인가?

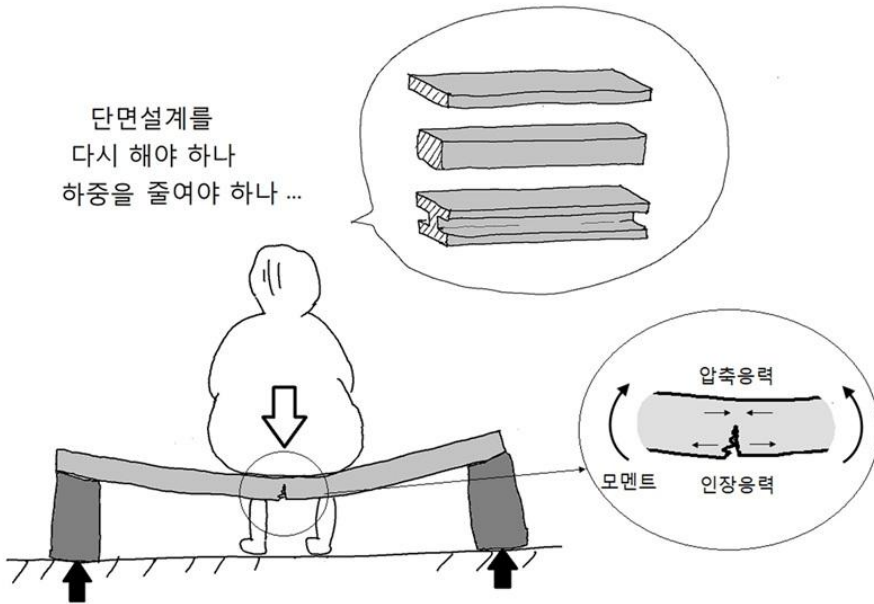
우선 외부에서 주어지는 힘 즉, 외력(外力)이 작용하면 재료 내부에는 이에 저항하는 힘이 생기는데 이를 응력(stress)이라고 합니다. 응력이란 단위 면적당 작용하는 힘을 말하며, 같은 힘을 주더라도 힘을 받는 면적이 넓으면 응력은 작아지게 됩니다.

<https://news.samsungdisplay.com> > ...

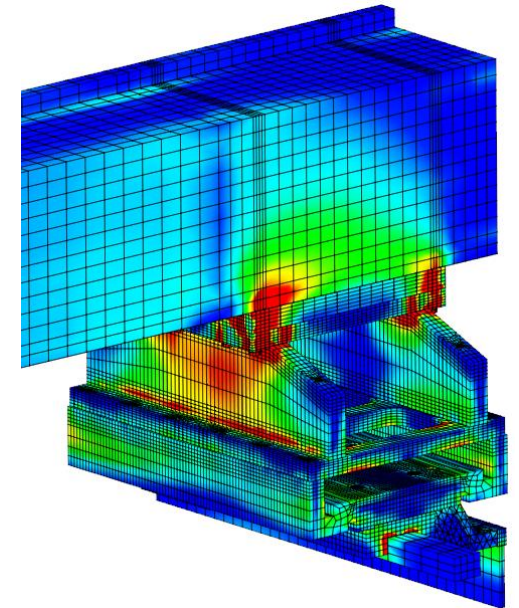
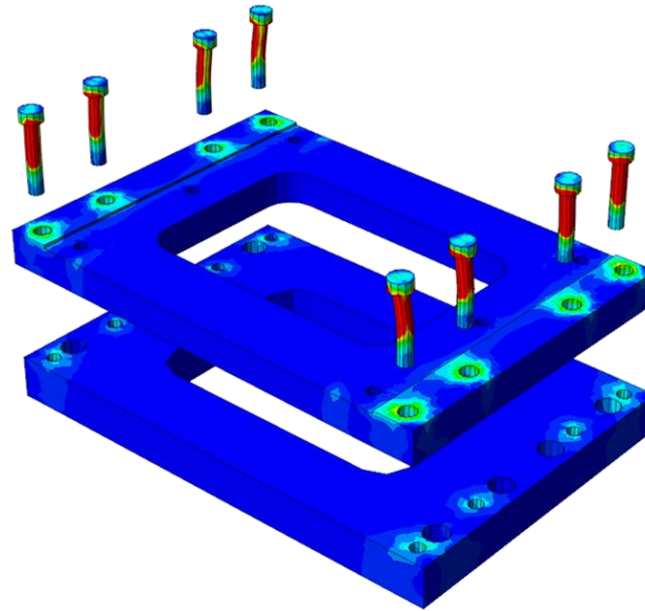
쉽게 알아보는 공학이야기 3 - 재료역학 편



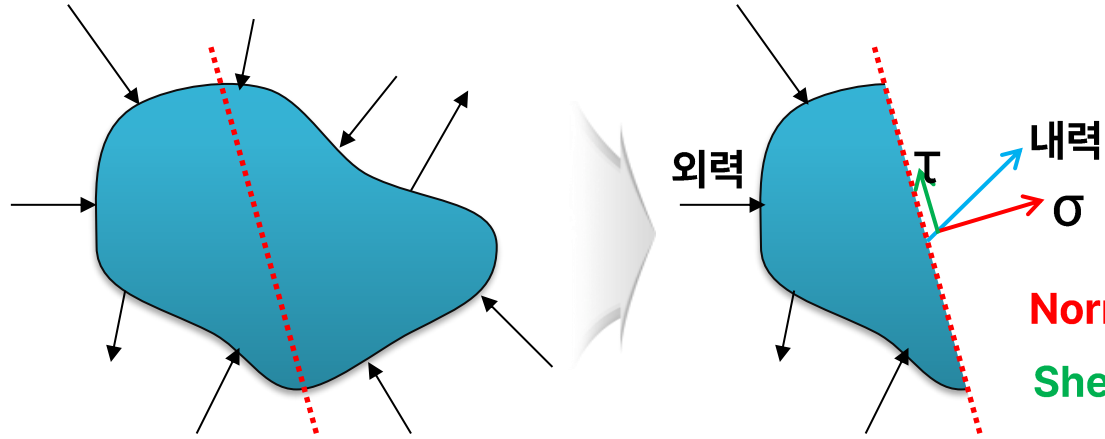
단면설계를
다시 해야 하나
하중을 줄여야 하나 ...



출처 : 삼성디스플레이 뉴스룸

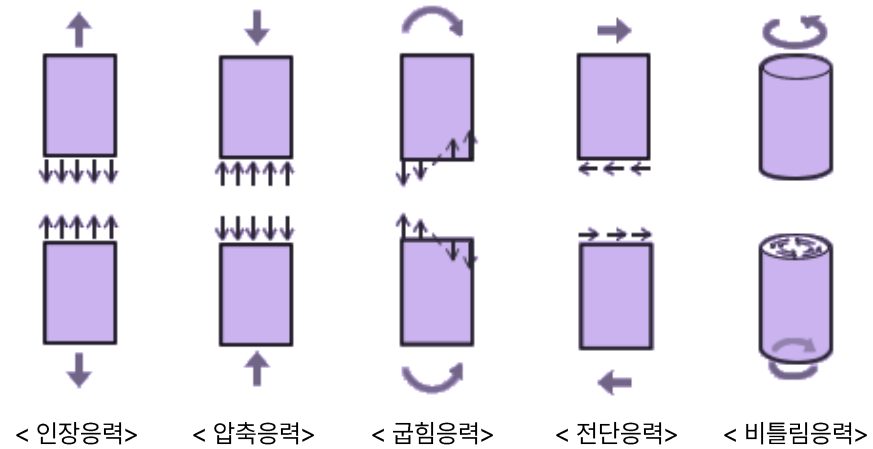
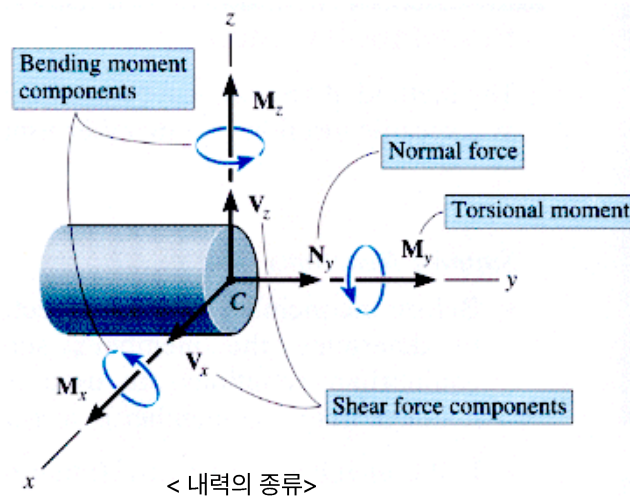


응력의 종류



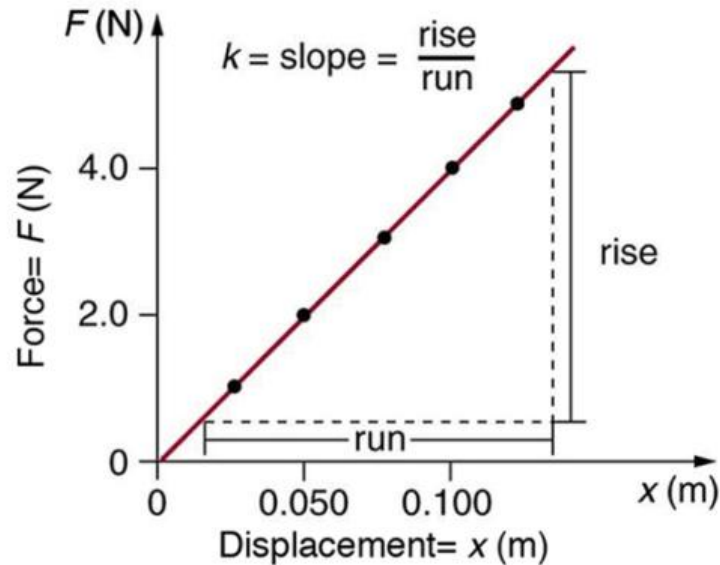
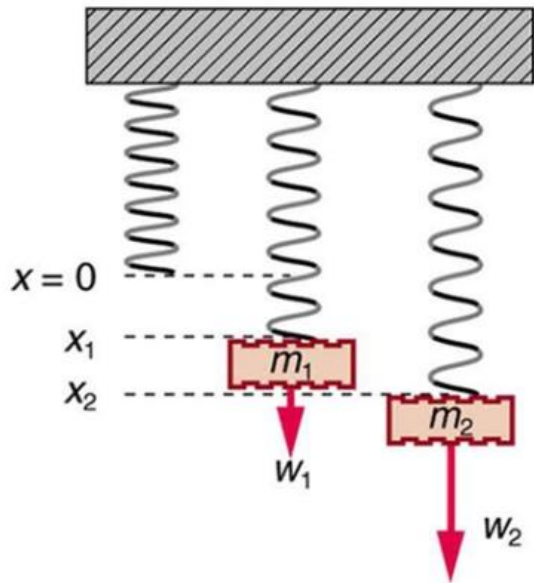
Normal Stress, $\sigma = F/A$

Shear Stress, $\tau = F/A$



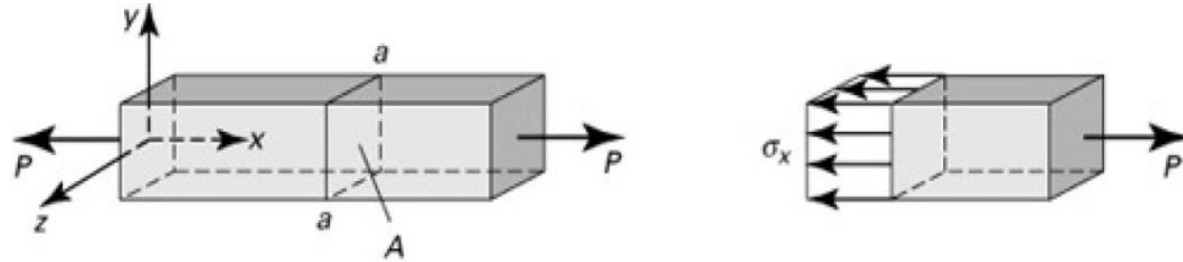
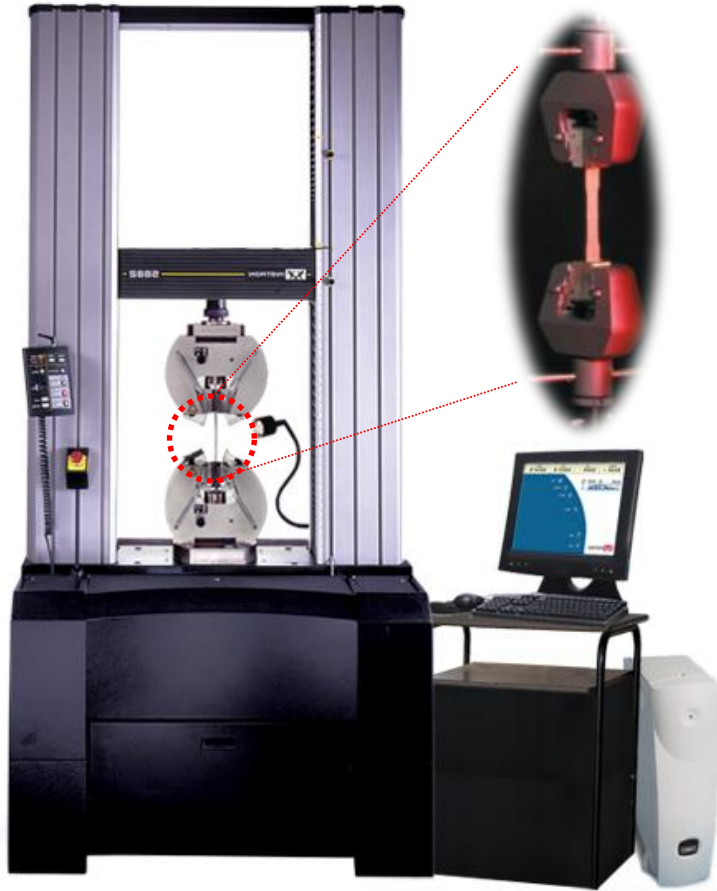
Robert Hooke - 힘(응력)과 변형(변형률)의 관계

“탄성물체에서는 가한 힘과 물체에 생긴 변형과는 비례”

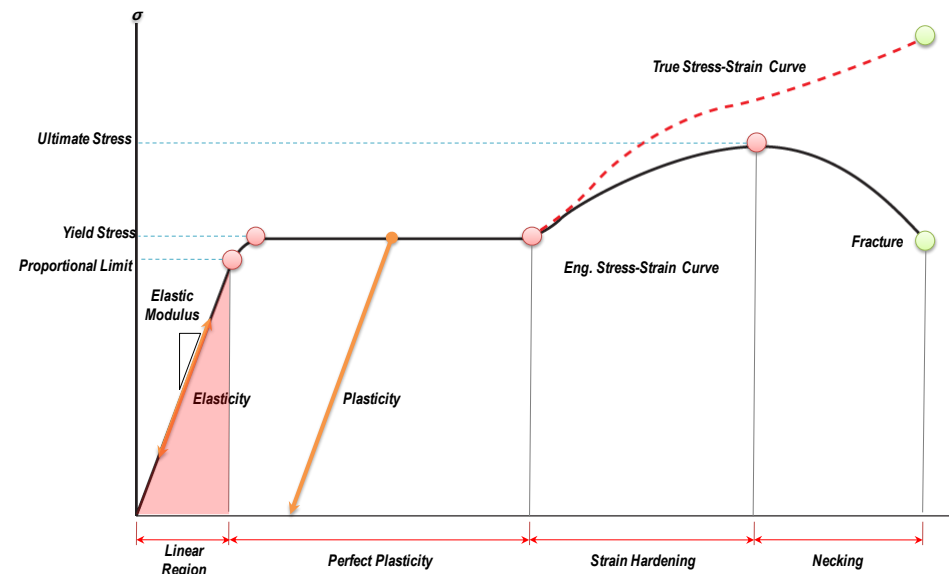


m (kg)	w (N)	x (m)
0.000	0.00	0.000
0.100	0.98	0.025
0.200	1.96	0.050
0.300	2.94	0.076
0.400	3.92	0.099
0.500	4.90	0.127

응력과 재료의 관계

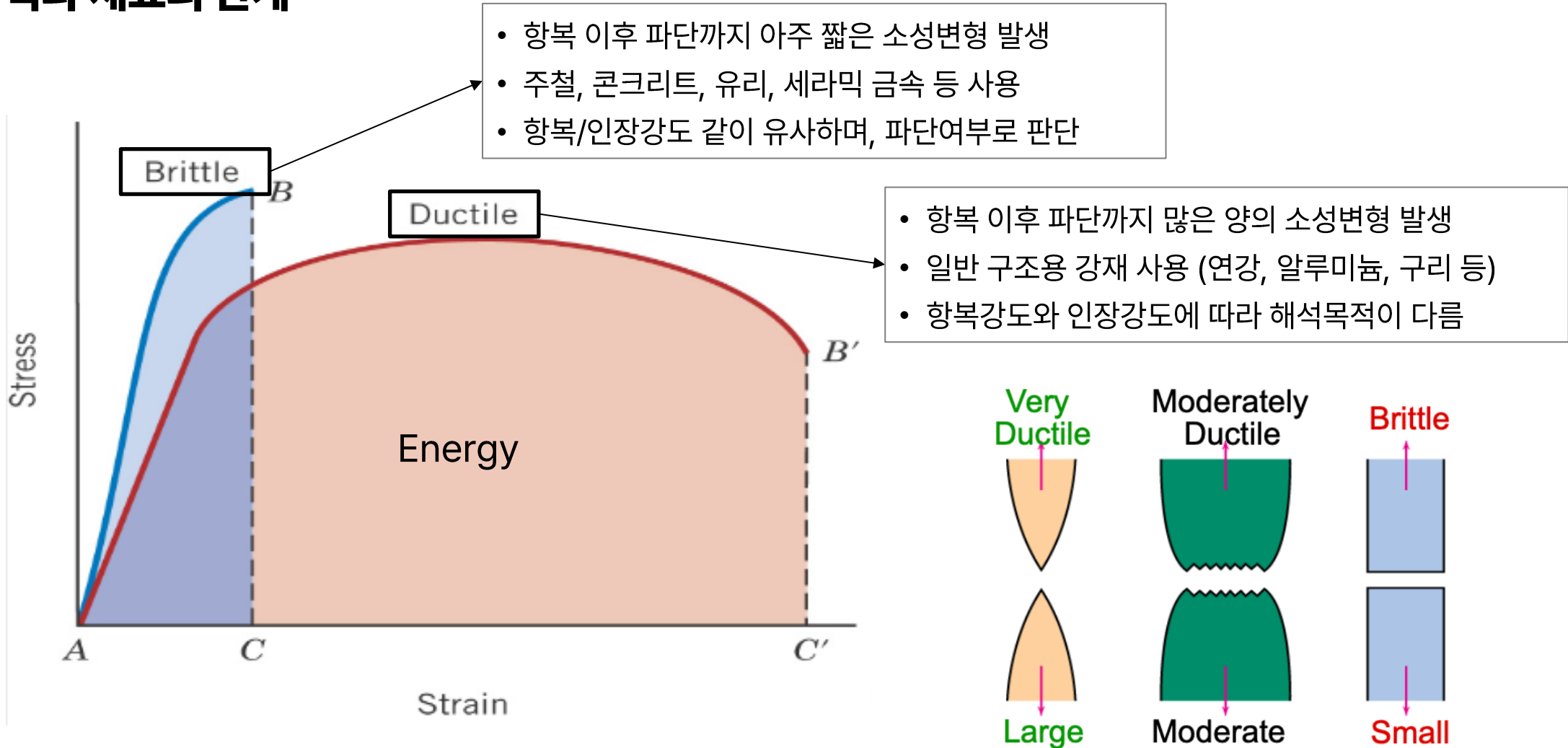


응력 (Stress)



변형률 (Strain)

응력과 재료의 관계



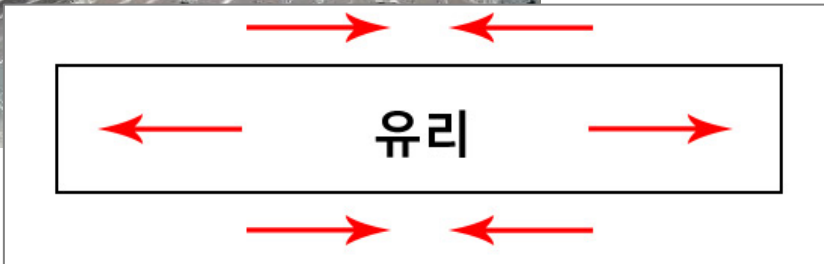
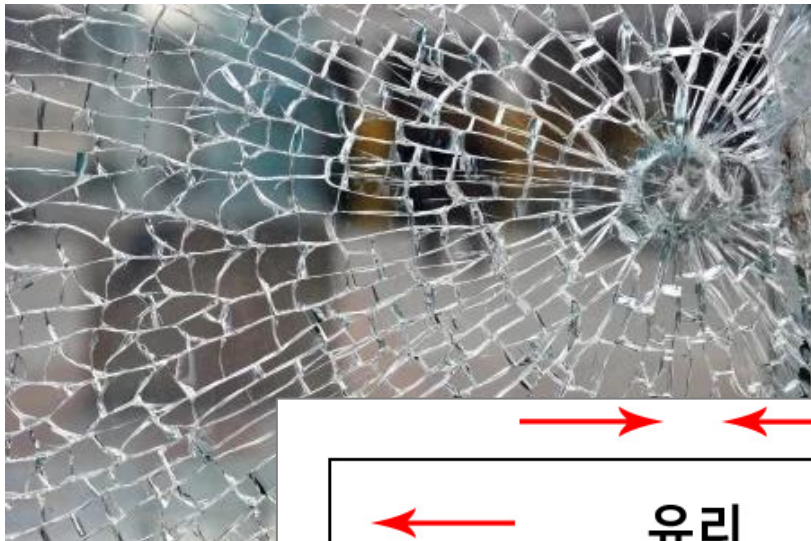
취성재료에 대한 이해

Keyword 1 : 인장강도

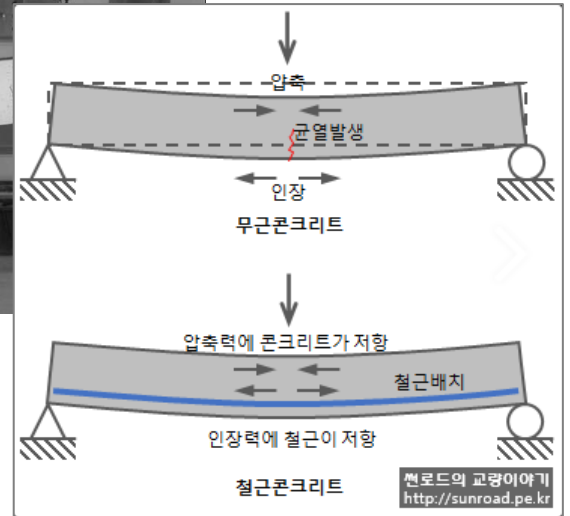
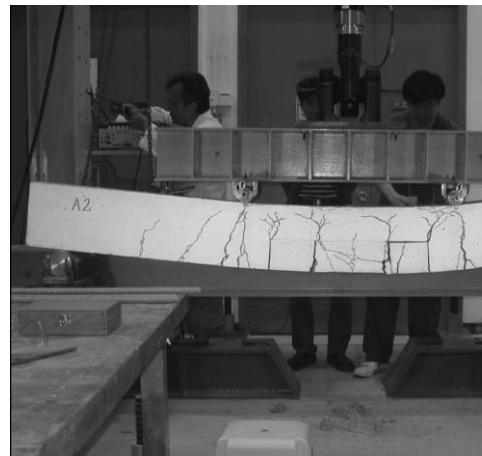
Keyword 2 : 압축강도

Keyword 3 : 인장파괴

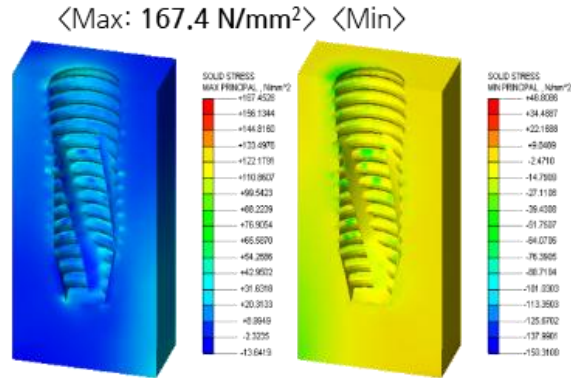
- 유리의 압축강도는 인장강도의 10배 이상 크다.
- 인장파괴가 주로 발생하며 이를 보강하는 방향으로 설계.
- 강화유리는 600도 이상의 고온에서 빠르게 식혀 외부에 압축력을 내부에 인장력이 발생하도록 하여 보강하는 방식 사용.



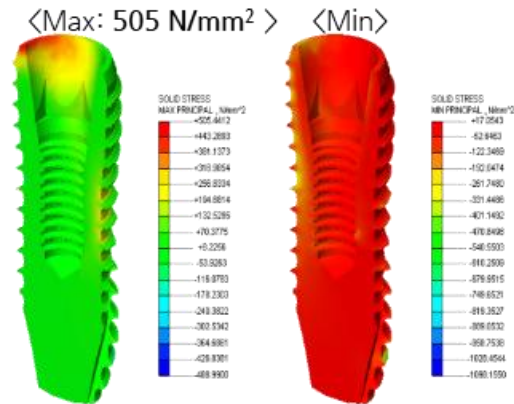
- 콘크리트의 압축강도는 인장강도의 10배 이상 크다.
- 인장파괴가 주로 발생하며 이를 보강하는 방향으로 설계.
- 인장 발생 위치에 철근을 배근하여 콘크리트 균열 이후에도 철근이 인장력을 견디는 방식 사용.



취성재료 해석결과 구분



<Maxillary Bone Principle Stress>



<Fixture Principle Stress>

Keyword 1 : 인장강도

Keyword 2 : 압축강도

Keyword 3 : 인장파괴

- 취성재료는 **주응력 (Principal Stress)** 평가
- 인장파괴에 대해서는 **최대수직응력 파손 이론** 적용

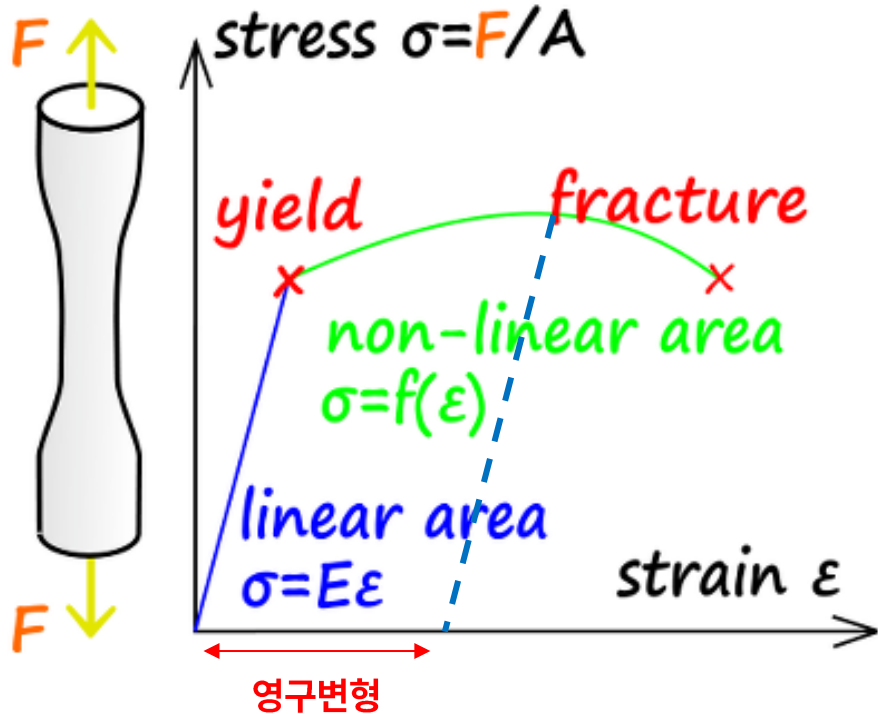
연성재료에 대한 이해

Keyword 1 : 항복강도

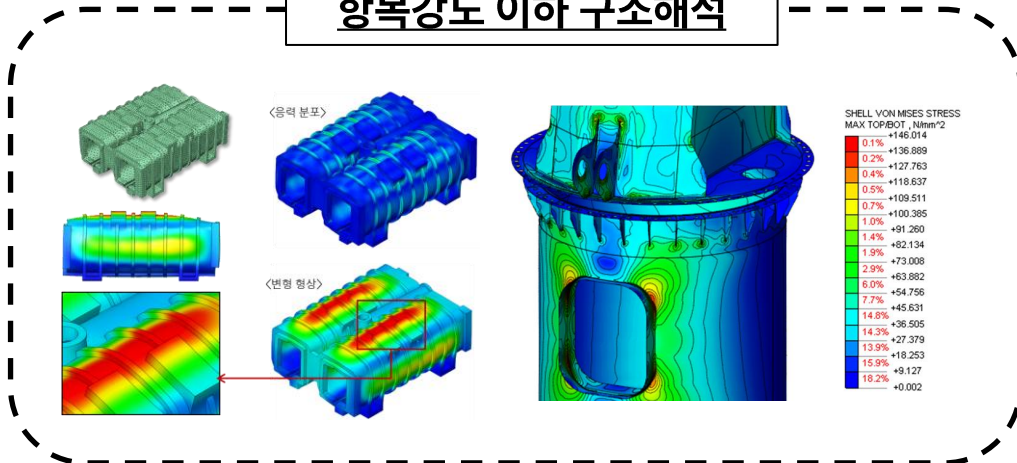
Keyword 2 : 전단파괴

Keyword 3 : 압축파괴

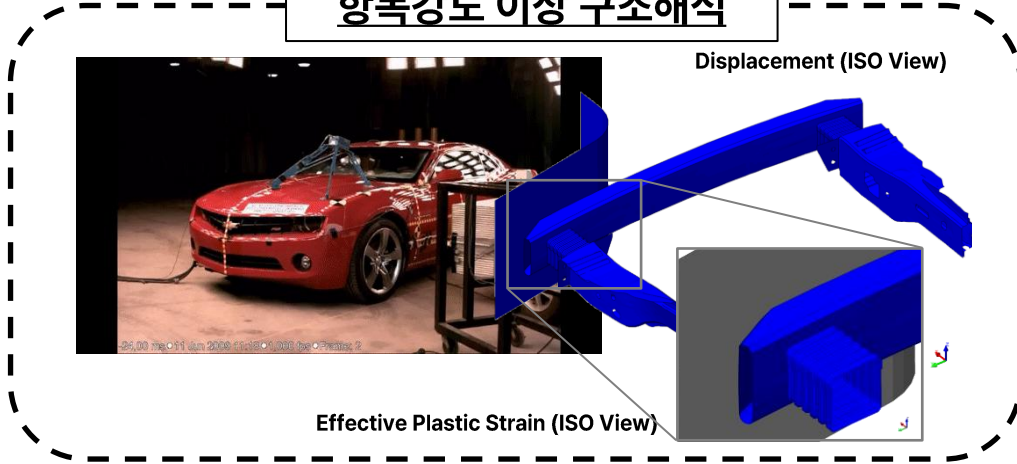
- 일반 강재는 인장강도가 압축강도와 유사하거나 강한 값을 가짐.
- 일반 강재에서 전단파괴(Slip)가 주로 발생하며, 특이사항으로 얇은 판재에서는 압축파괴(Buckling)이 발생.




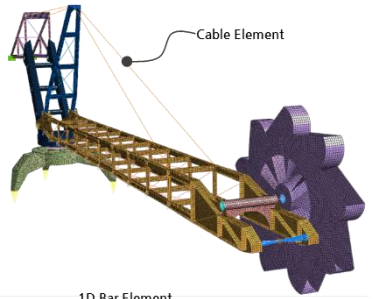
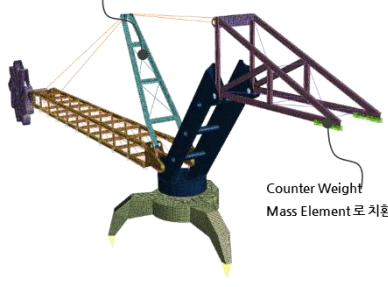
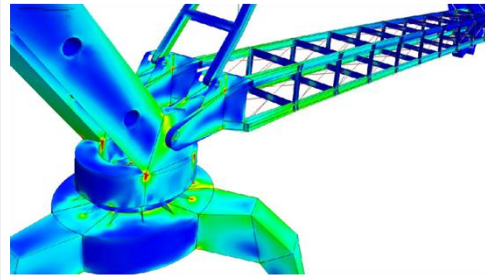
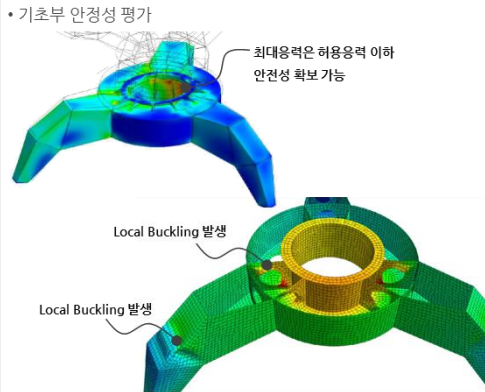
항복강도 이하 구조해석



항복강도 이상 구조해석



연성재료 해석결과 구분 (항복이하 구조물)

Overview	Pre Processing	Post Processing
<p>해석의 목적</p> <p>경량 구조로 새롭게 설계된 Stacker에 컨베이어, 기어 박스 및 버킷 휠의 이동 중에 발생하는 하중에 대한 구조 안전성 및 좌굴 특성 분석</p> <p>해석 종류 및 모델</p> <ul style="list-style-type: none"> 비선형정적해석 좌굴해석 	<ul style="list-style-type: none"> 모델링 : 1D Bar Element & 2D Quad Element 해석 조건 <ul style="list-style-type: none"> Stacker 자중 컨베이어, 기어박스, 버킷 휠 이동시 발생하는 하중  	<ul style="list-style-type: none"> 구조 안전성 평가  기초부 안정성 평가  <ul style="list-style-type: none"> 최대응력은 허용응력 이하 안전성 확보 가능 Local Buckling 발생 Local Buckling 발생

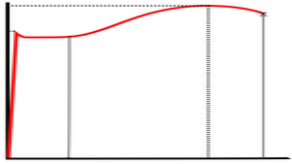

Keyword 1 : 항복강도

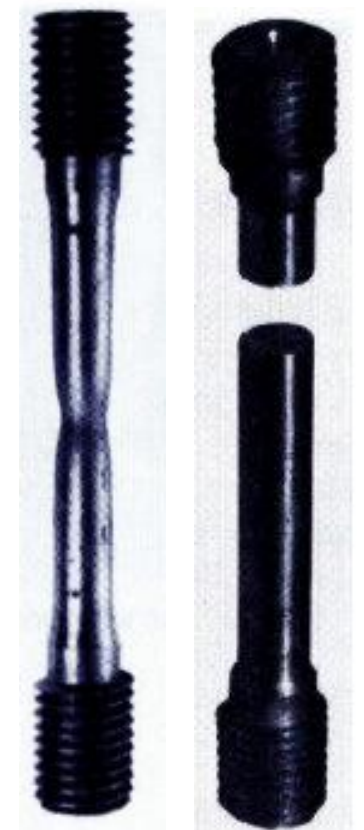
Keyword 2 : 전단파괴

Keyword 3 : 압축파괴

- 연성재료는 **등가응력 (Equivalent Stress)** 평가
- 일반 강재에서 주름 이루는 전단파괴는 **최대전단응력** 및 **최대변형률에너지 이론** 적용
- 얇은 판재에서만 발생하는 **압축파괴**는 **좌굴해석**을 통해 **별도로 검토**

재료특성에 따른 분류와 파손이론

연성재료 (Ductile)	취성재료 (Brittle)
구부리는 굽혀지는 재료 (→ 호박엿)	구부리면 부러지는 재료 (→ 가락엿)
파단에 앞서 상당한 양의 항복(소성변형)이 발생 	파단에 앞서 아주 짧게 항복(소성변형)이 발생 
Mild Steel, Aluminum, Aluminum Alloys, Copper, Magnesium, Lead, Teflon → 일반적인 구조용 강재	Cast Iron, Concrete, Stone, Glass, Ceramic Materials, Metallic Alloys
파손이론 (Failure Theory) / 항복조건 (Yield Criteria)	
최대 비틀림 에너지 이론 (von Mises) → 유효응력: von-Mises Stress 최대 전단응력 이론 (Max. Shear, Tresca) → 유효응력: Stress Intensity	최대 주응력 이론 (Rankine) → 유효응력: Principal Stress



CONTENTS

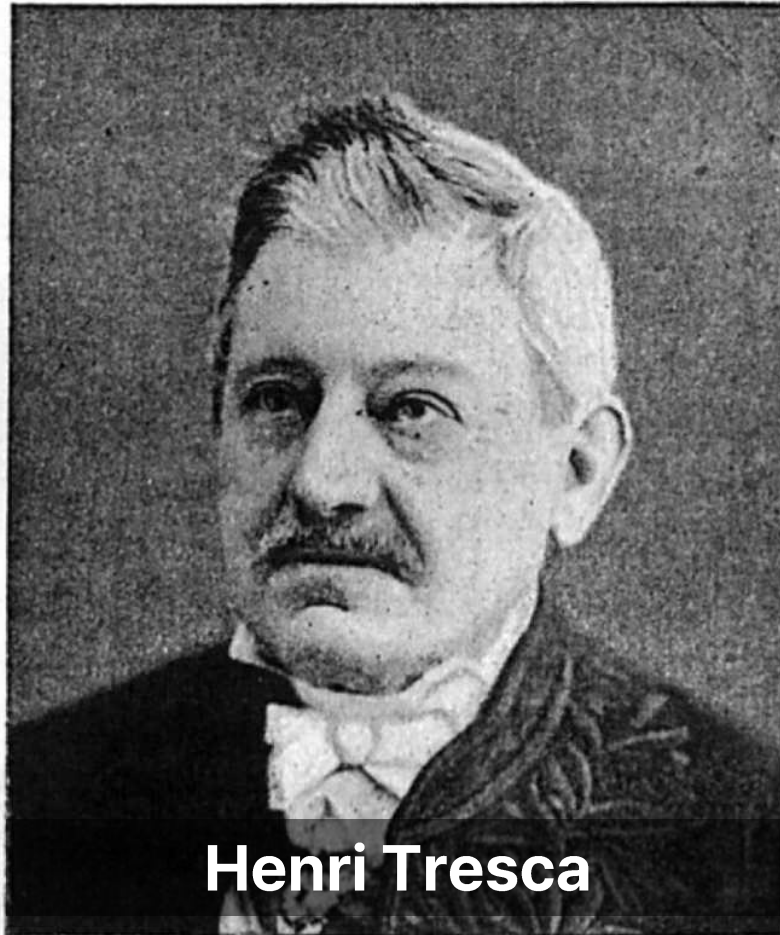
해석 결과 활용 방법

Part 1. 변위와 응력에 대한 이해

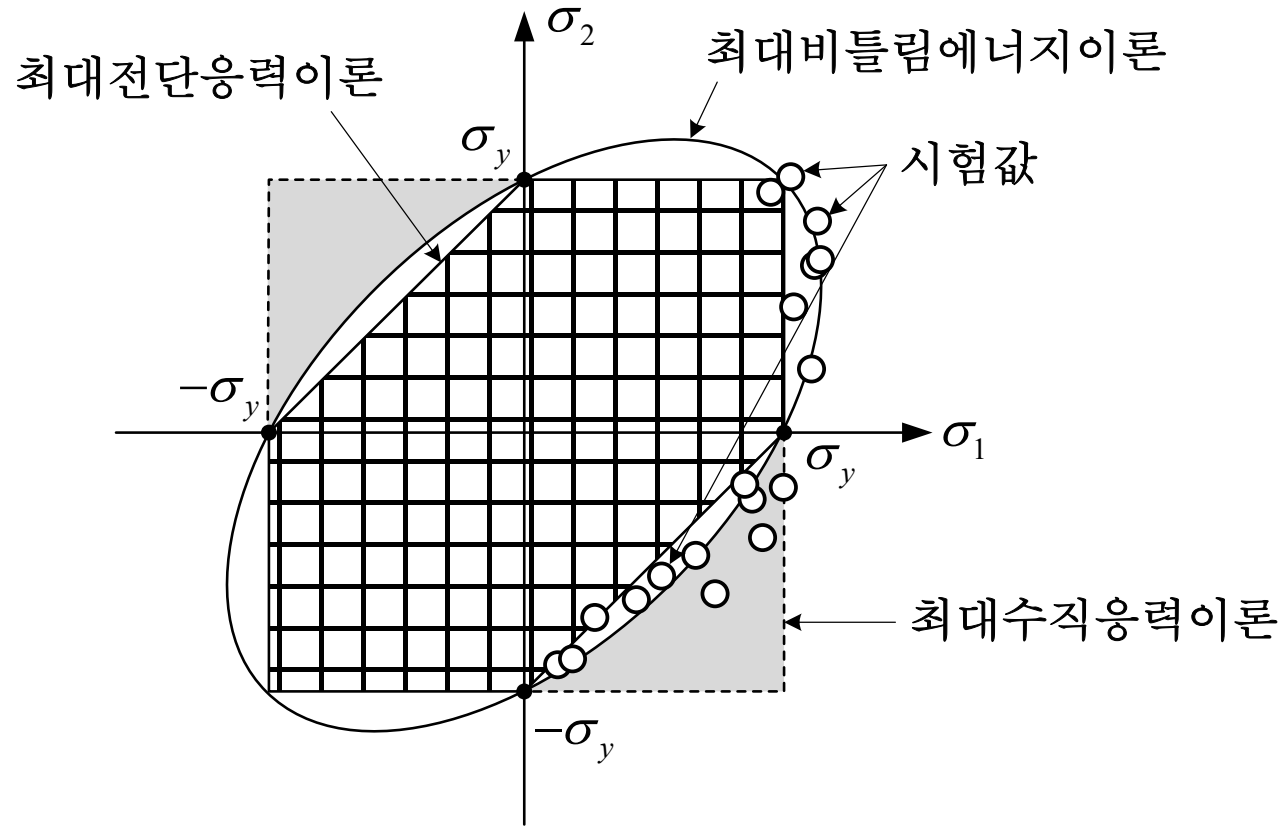
Part 2. 재료별 파손이론 및 응력에 대한 이해

Part 3. 해석결과 후처리과정 고려사항

재료 파손이론 비교



재료 파손이론 비교



연성(Ductile) 재료

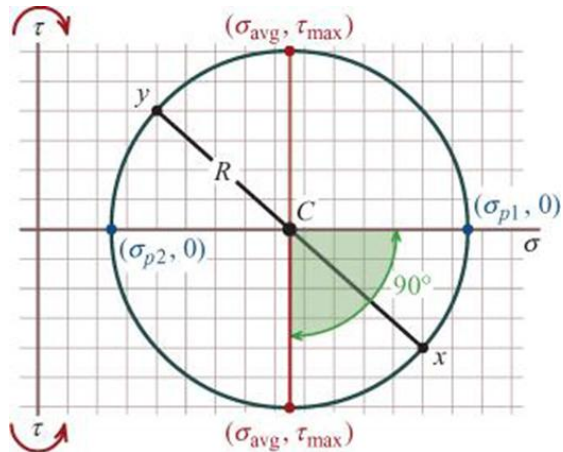
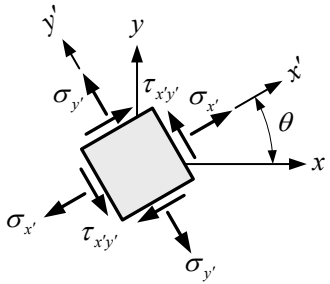
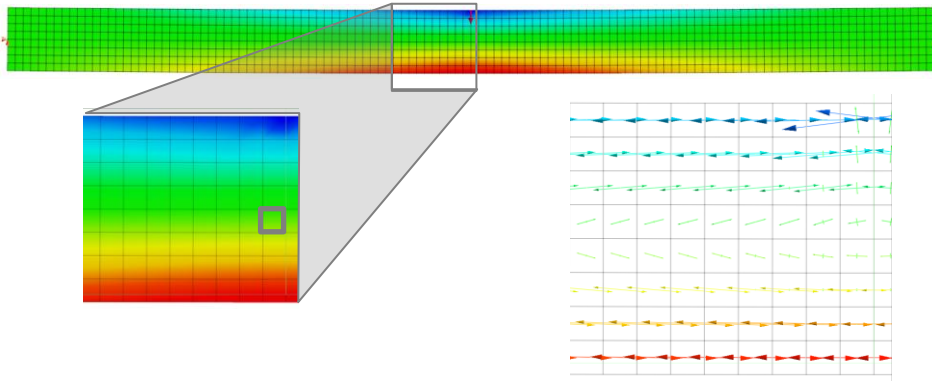
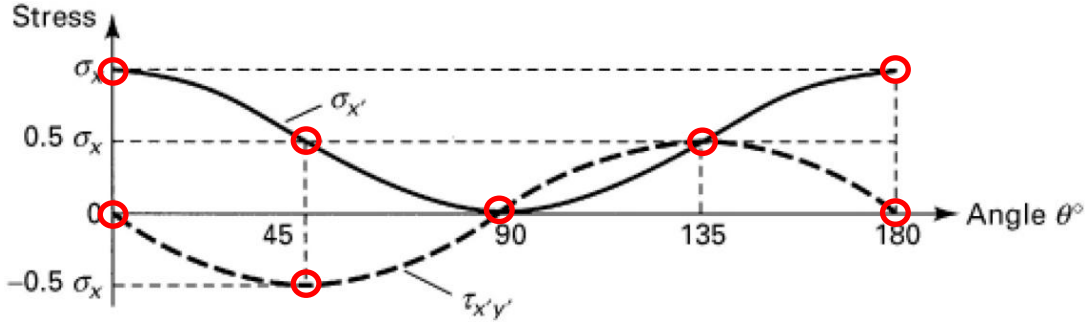
- : 최대전단응력이론 (Henri Tresca)
- : 최대변형률에너지이론 (Richard von Mises)

취성(Brittle) 재료

- : 최대주응력이론 (William Rankine)

응력성분에 대한 이해

주응력(Principal stress)란? 임의의 단면에서 전단응력이 0이었을 때 단면에 수직으로 작용하는 응력



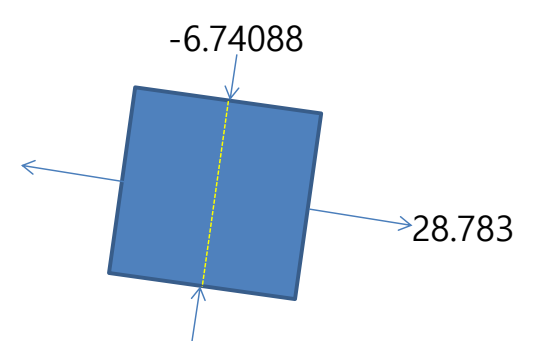
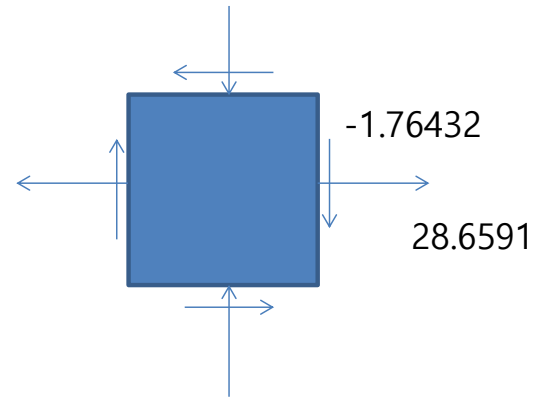
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sigma_{max}$$

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

[평면응력]

-6.65304

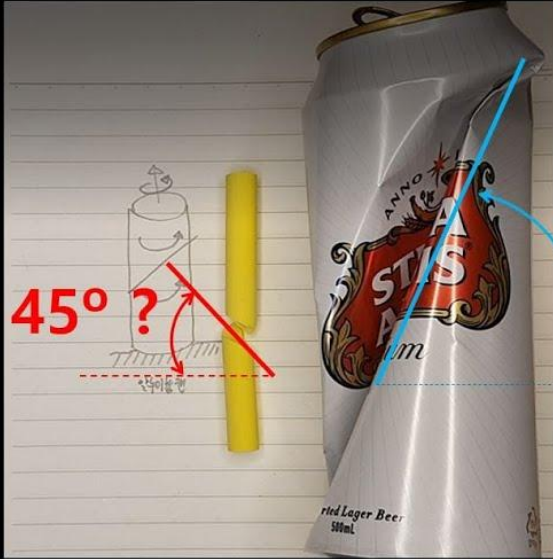
[주응력]



재료별 파괴양상 비교

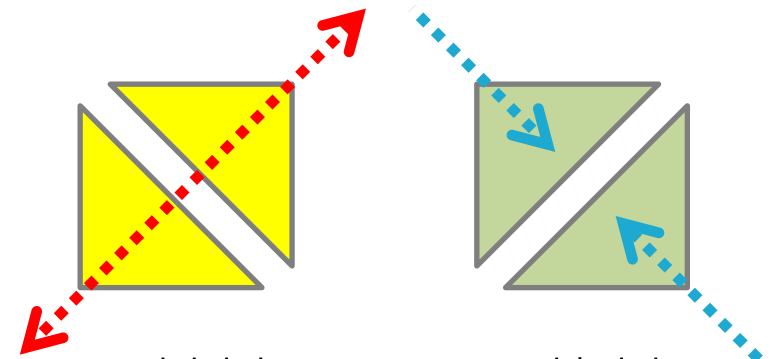
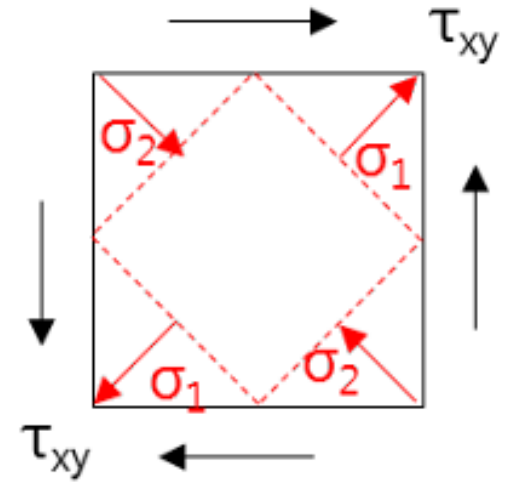
Mechanics

모어원 예제 (Mohr's Circle)



45° ?

- 도대체 왜 45도로 기울기로 깨지는 거지?
- 왜 분필과 알루미늄 캔은 정반대 방향으로 파손되지?



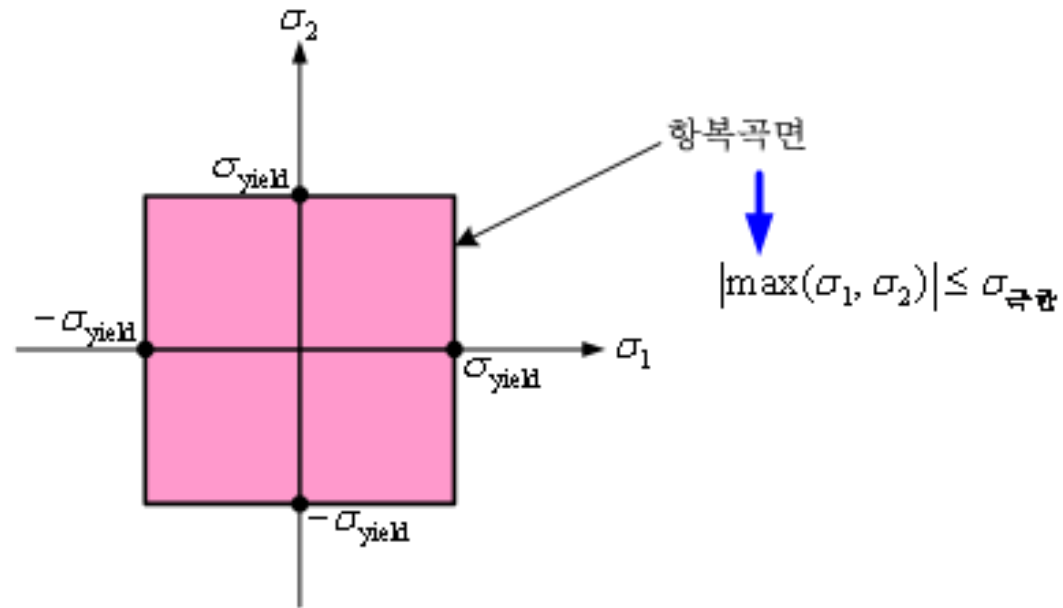
인장파괴
(취성재료)

압축파괴
(연성재료, 좌굴)

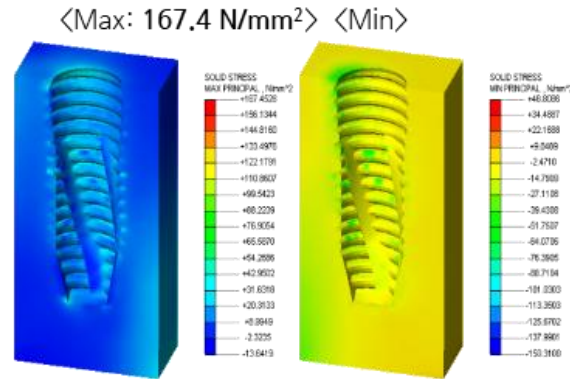
취성(Brittle) 재료 : 최대 주응력 이론



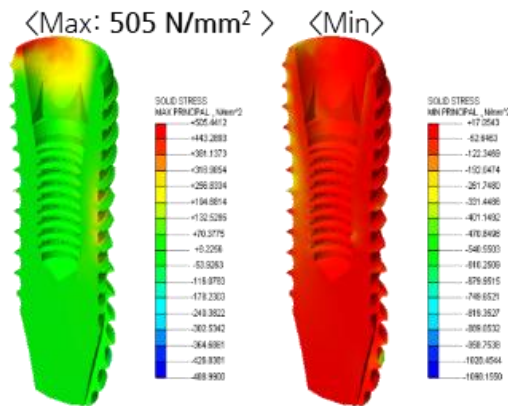
- 인장 또는 압축상태에서 σ_1 또는 σ_3 가 파괴강도에 도달할 때 파괴가 발생함
- 항복에 의한 파괴는 항복강도에 도달할 때 발생
- 파괴에 의한 파손은 극한강도에 도달할 때 발생



취성(Brittle) 재료 : 응력평가 방법



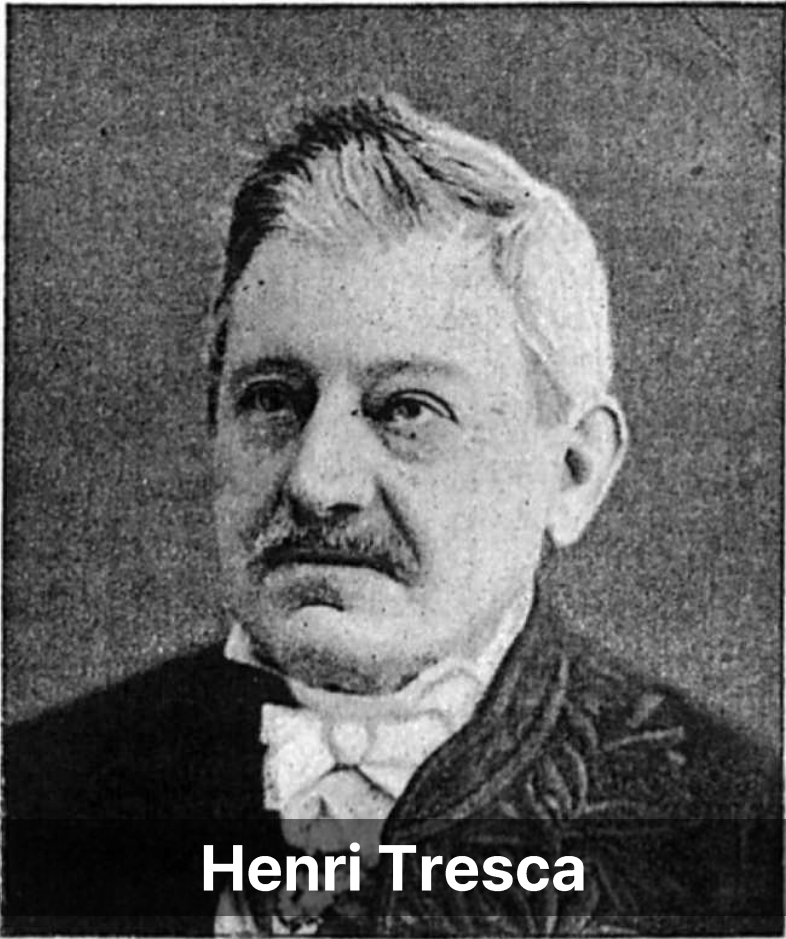
<Maxillary Bone Principle Stress>



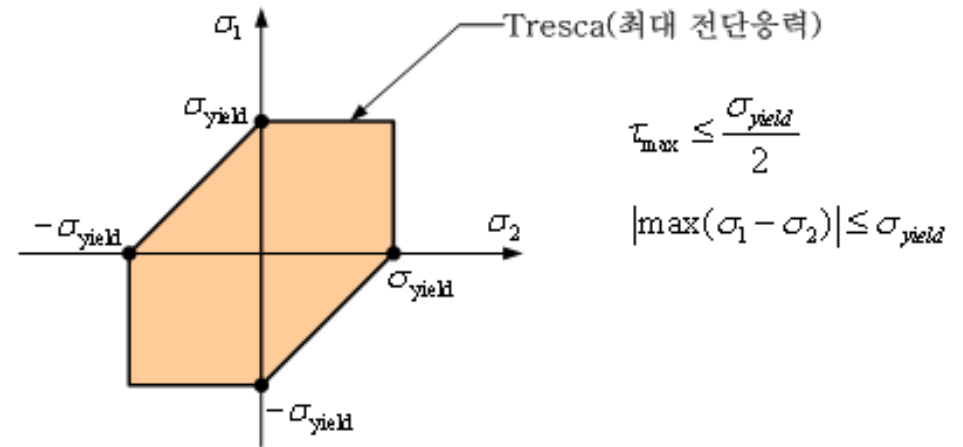
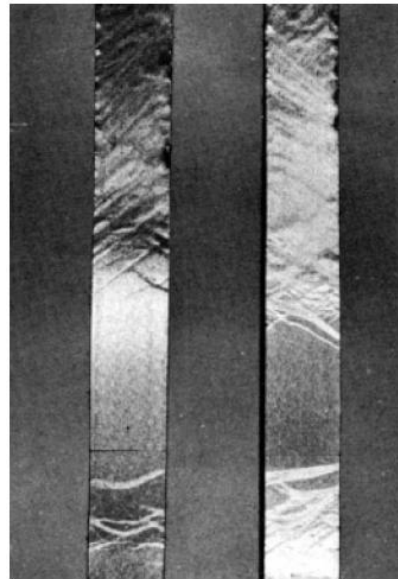
<Fixture Principle Stress>

- 일반적으로 **취성재료의 경우 압축강도가 인장강도에 비해 10배** 크므로, 각각 별도로 **주응력 성분을 구분하여 평가**
- 항복강도와 인장강도의 차이가 크지 않아 유사의미 사용
- 해석결과에서 주응력 성분별 구분은 아래와 같음
 - 1차 주응력 : 최대 인장응력 < 인장강도
 - 2차 주응력 : 최대 전단응력
 - 3차 주응력 : 최대 압축응력 < 압축강도
- 취성재료에서는 인장 파괴가 지배적이기 때문에 1차 주응력을 주요하게 평가

연성(Ductile) 재료 : 최대 전단응력 이론



- 인장시험에서 동일한 재료의 모든 시편에서 최대 전단응력과 같거나 초과할 때 항복이 발생함. (연성재료와 유사)
- 전단변형에너지 이론(Von-mises)에 비해 부정확하나 보수적이므로 설계시 사용 (ex. ASME 설계 코드)



연성(Ductile) 재료 : 최대 전단응력 이론



III

Division 1 — Subsection NB

Class 1 Components

RULES FOR CONSTRUCTION OF NUCLEAR FACILITY COMPONENTS

ASME Boiler and Pressure Vessel Committee
Subcommittee on Nuclear Power



NB-3212 Basis for Determining Stresses

The theory of failure, used in the rules of this Subsection for combining stresses, is the maximum shear stress theory. The maximum shear stress at a point is equal to one-half the difference between the algebraically largest and the algebraically smallest of the three principal stresses at the point.

NB-3213 Terms Relating to Stress Analysis

Terms used in this Subsection relating to stress analysis are defined in the following subparagraphs.

NB-3213.1 Stress Intensity.² Stress intensity is the equivalent intensity of combined stress, or, in short, the stress intensity is defined as twice the maximum shear stress. In other words, the stress intensity is the difference between the algebraically largest principal stress and the algebraically smallest principal stress at a given point. Tensile stresses are considered positive and compressive stresses are considered negative.

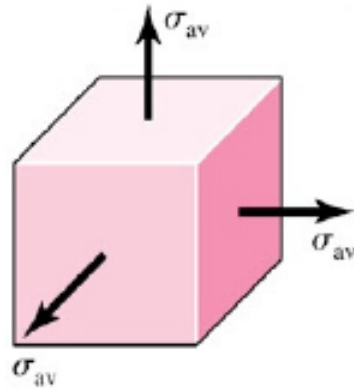
FEM 주요 응력표기 명칭

- Stress Intensity
- Tresca Stress

연성(Ductile) 재료 : 최대 변형률에너지 이론



- 정수압 응력을 받는 연성 재료의 항복강도가 일축 인장시험에서 얻는 항복강도보다 크다는 현상에 유래 (단순 인장, 압축 현상뿐 아니라 변형과 관계)
- 구조물의 단위 체적당 변형에너지가 일축 인장/압축 상태에서 항복이 발생할 때의 단위 체적당 변형에너지와 같거나 클 때 항복이 발생.



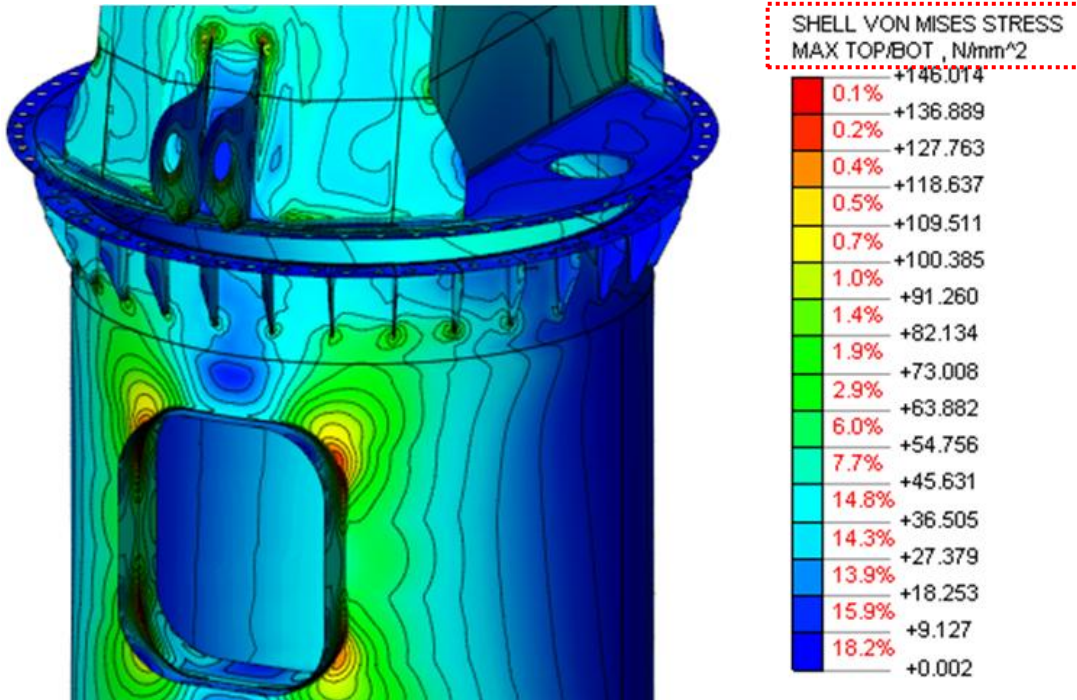
✓ **인장 시험 주응력 상태 = 전단 변형률 에너지**

$$\frac{1+\nu}{3E} S_y^2 = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]$$

✓ **항복조건**

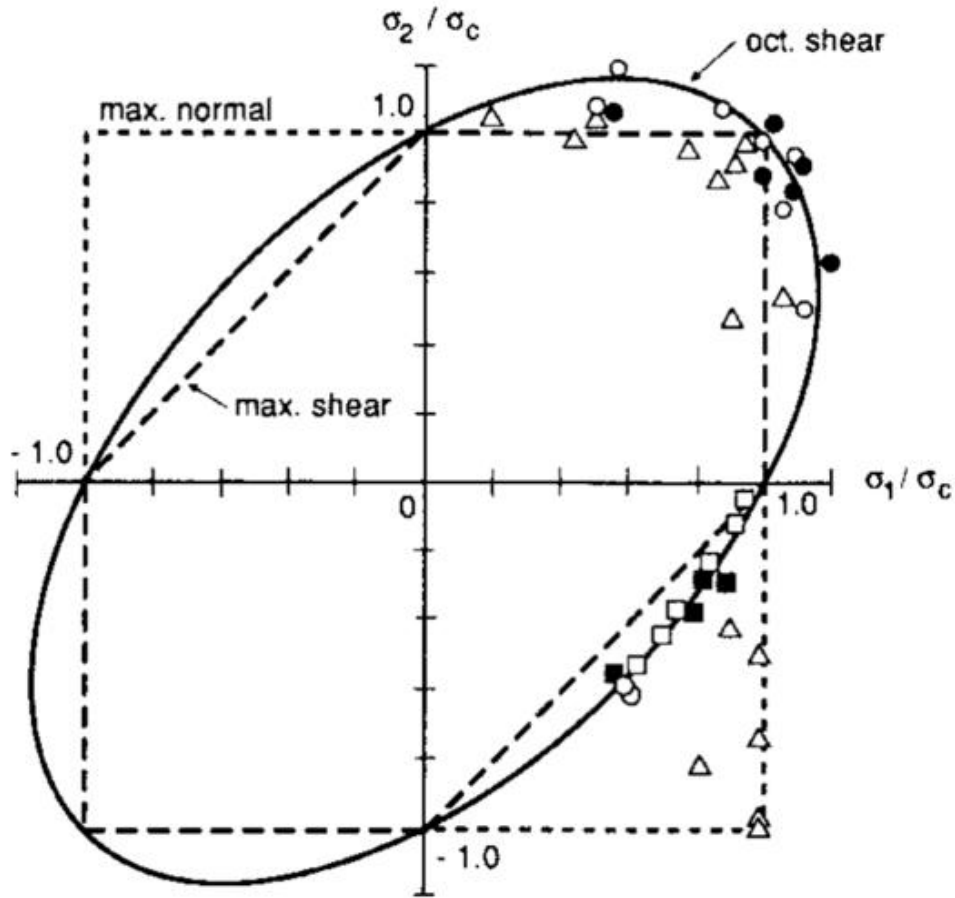
$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y$$

연성(Ductile) 재료 : 응력평가 방법



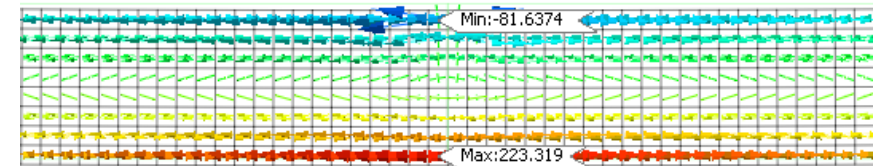
- 일반적으로 연성재료의 경우 인장/압축에 동일한 등방성으로, 조합응력(Tresca, Von-mises) 성분으로 평가
- 두 가지 이론 모두 항복시점을 전제하에 정립된 이론으로 항복강도 이상의 소성영역에 대해서는 적용 불가능
- 해석결과에서 이론별 응력 구분은 아래와 같음
 - Tresca(or Intensity) : 보수적 평가 or 원자력기기 설계용
 - Von-mises : 일반 기계품 설계용
- 조합응력과 재료의 항복응력을 비교하여 평가

재료별 파손이론 비교

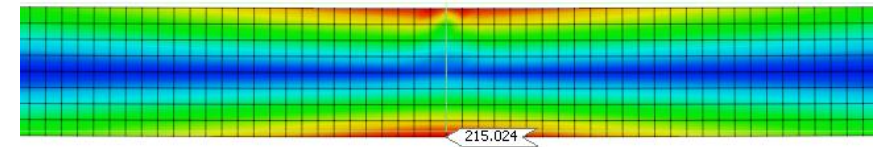


출처 : Dowling, N.E., *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1993.

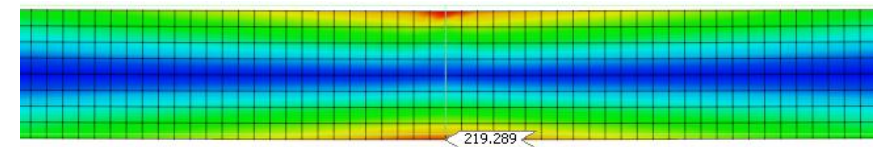
• Principal Stress



• Tresca Stress or Stress Intensity



• von-Mises Stress



재료별 파손이론 비교

- 최대 비틀림 에너지 이론 (**von Mises**) → 연성재료
 - 조합응력상태의 뒤틀림 (Distortion) 에너지가 단순인장시험의 뒤틀림 에너지와 같아지면 항복이 발생하는 것으로 판단함.
 - ※ 일반적으로 실험결과와 가장 잘 일치함.
- 최대 전단응력 이론 (**Tresca**) → 연성재료
 - 최대 전단응력이 단순인장시험에서의 최대전단응력(항복응력의 1/2)과 같아지면 항복이 발생하는 것으로 판단함.
 - 실험결과에 근접하면서 보수적인 값을 제공하므로 실제 설계(특히, **취약부 설계**)와 **전단에 저항하는 부분(필렛 용접부 등)**에 많이 사용됨.
- 최대 주응력 이론 → 취성재료
 - 최대 주응력이 극한강도(σ_u)를 초과하는 순간, 파손이 발생하는 것으로 판단함.
 - 취성재료에 대해 실험 결과에 가장 일치함.

CONTENTS

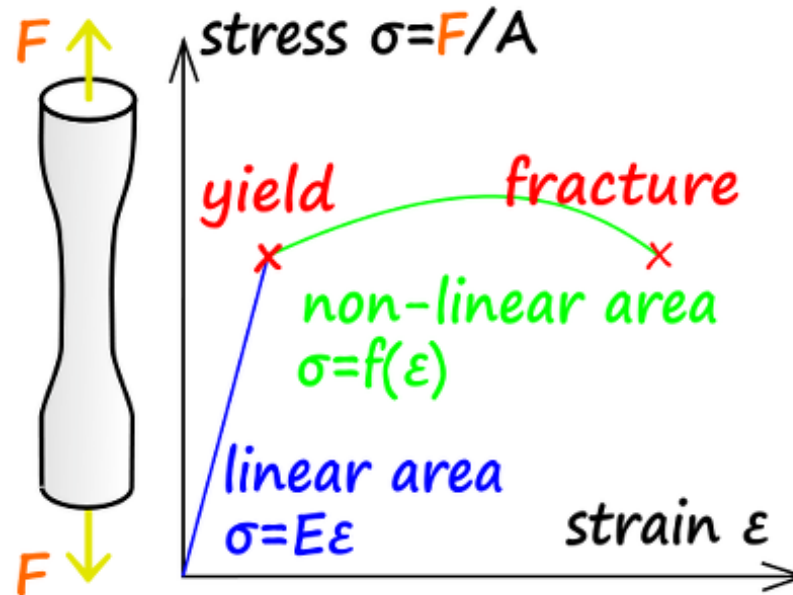
해석 결과 활용 방법

Part 1. 변위와 응력에 대한 이해

Part 2. 재료별 파손이론 및 응력에 대한 이해

Part 3. 해석결과 후처리과정 고려사항

해석 후 어떤 것들을 고려해야되는가?



이론 평가기준

- 변위제한 (Deformation limit)
- 탄성한도 (Yield stress)
- 파괴여부 (Tensile stress)

해석 후 어떤 것들을 고려해야되는가?



안전성 고려사항

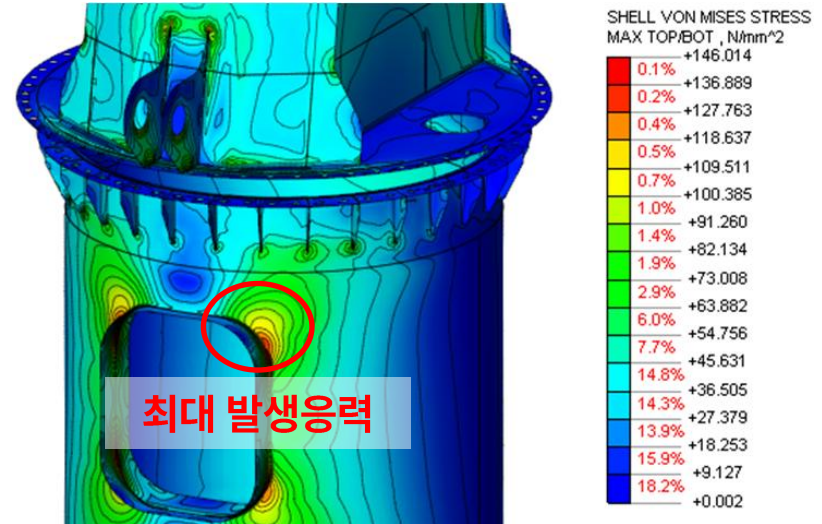
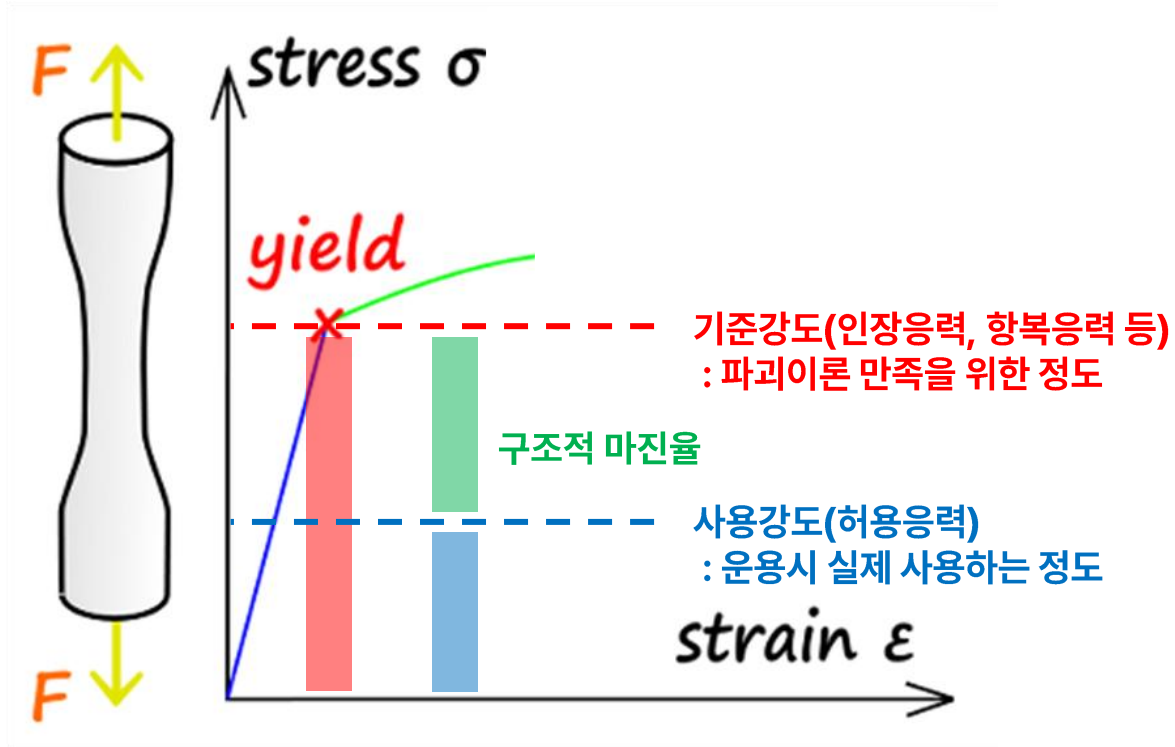
- 안전계수 (Safety Factor)
- 설계기준 (Design Standard)
- 피로수명 (Fatigue life)
- 연결부 & 기초 파괴
- 구조물 전도, 탈선 등

⋮

- 고려하지 못한 하중, 휴먼에러(설계, 제작, 시공), 환경 및 구조물의 변화 등 정확한 평가 불가능
- 제품설계시 가장 위험한 상황에서의 보수적인 평가가 필요

안전계수(Safety Factor)란 무엇인가?

: 재료 기준강도(인장응력, 항복응력 등)와 가장 위험한 환경의 제품 사용강도(허용응력)의 비율



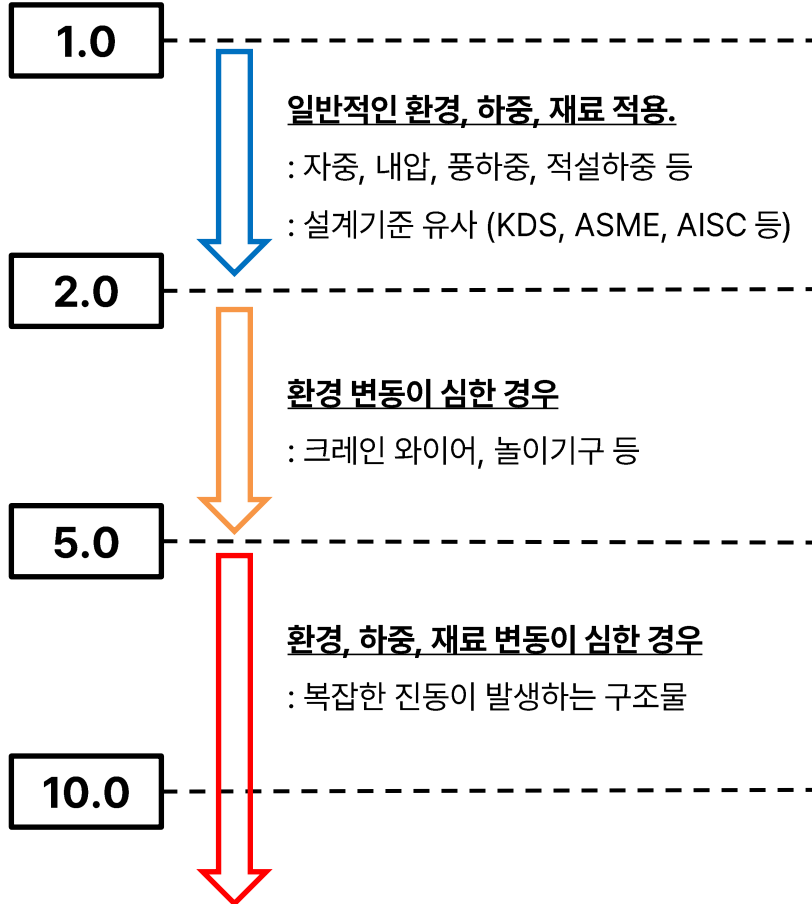
최대 발생응력 < 재료 허용응력 경우 안전

If, 재료 항복강도가 275 MPa, 안전계수 1.5 인 경우
 → 허용응력 = 항복강도/안전계수 = 275/1.5 = 183.33 MPa

해석결과, 146.01 MPa < 183.33 MPa ... **O.K.**

안전계수(Safety Factor)란 무엇인가?

: 기준강도(인장응력, 항복응력 등)와 사용강도(허용응력)의 비율



KDS 14 30 10 : 2019, 인장재 안전계수 1.67

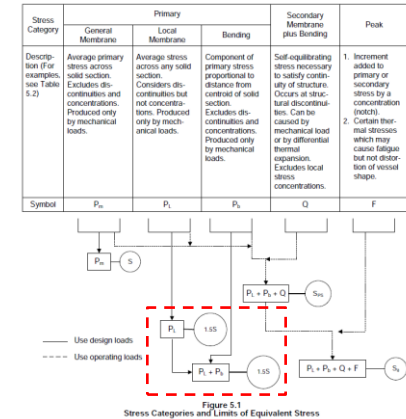
(1) 허용인장응력 F_t 는 종단면적에 대해서는 $0.6F_u$ 를, 유효단면적에 대해서는 $0.6F_u$ 로 한다.

$$F_t = \begin{cases} 0.6F_u & \text{종단면적에 대한 검토} & (4-3-1) \\ 0.6F_u & \text{유효단면적에 대한 검토} & (4-3-2) \end{cases}$$

단, $\frac{L}{r} \leq 300$

여기서, F_u = 인장부재의 기본허용응력 (MPa)
 F_y = 강재의 항복강도 (MPa)
 F_u = 강재의 인장강도 (MPa)
 L = 부재의 길이 (mm)
 r = 단면의 회전반경 (mm)

ASME Sec.VII Div.2, 1차 하중 안전계수 1.5~1.7



산업안전보건기준에 관한 규칙

제163조(와이어로프 등 달기구의 안전계수) ① 사업주는 양중기의 와이어로프 등 달기구의 안전계수(달기구 절단하중의 값을 그 달기구에 걸리는 하중의 최대값으로 나눈 값을 말한다)가 다음 각 호의 구분에 따른 기준에 맞지 아니한 경우에는 이를 사용해서는 아니 된다.

1. 근로자가 탑승하는 운반구를 지지하는 달기 와이어로프 또는 달기체인인 경우: 10 이상
2. 화물의 하중을 직접 지지하는 달기 와이어로프 또는 달기체인인 경우: 5 이상
3. 혹, 샤프, 클램프, 리프팅 빔의 경우: 3 이상
4. 그 밖의 경우: 4 이상

② 사업주는 달기구의 경우 최대허용하중 등의 표시가 견고하게 붙어 있는 것을 사용하여야 한다.

안전계수(Safety Factor) 적용 예시



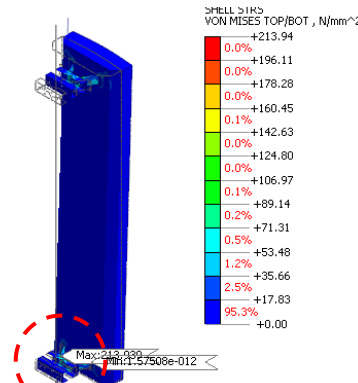
[국립전파연구원 고시 품압하중]

제9조(품압하중) ① 옥외 통신설비에 대한 기본품압하중은 아래의 표와 같다.

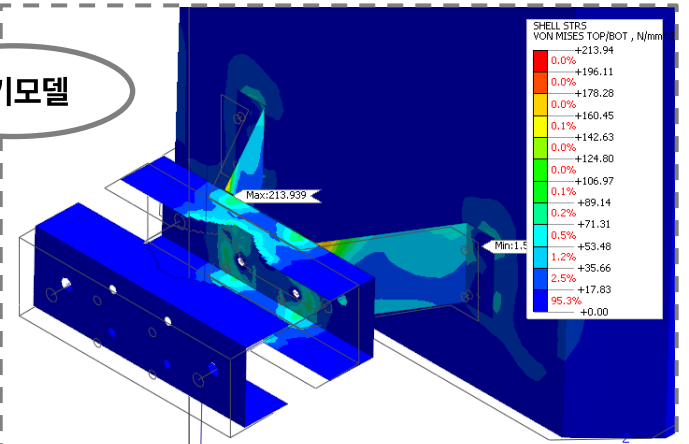
품압을 받는 시설물		시설물의 수직투영면적 1㎡에 대한 품압	
전주류	목주 또는 철근콘크리트주		80kg
	철주	원통주	80kg
		삼각주 또는 사각주	190kg
		각주(강관에 의하여 구성된 것에 한한다)	150kg
		기타의 것	240kg
무선시설류	철탑	강관에 의하여 구성된 것	170kg
		기타의 것	290kg
	철탑에 부착 시설되는 안테나류		200kg
	마이크로웨이브안테나		200kg
기타	<u>통신선(고정클램프 포함) 또는 조가선</u>		100kg
	완철류 또는 합류		160kg

***KDS 14 30 15 기준 허용응력은 0.6*Fy 로 산정**

초기모델 해석결과



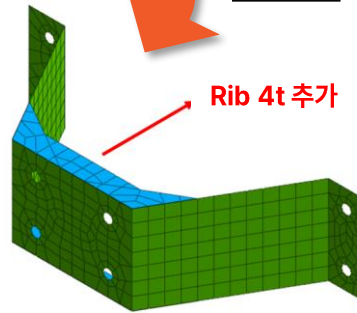
초기모델



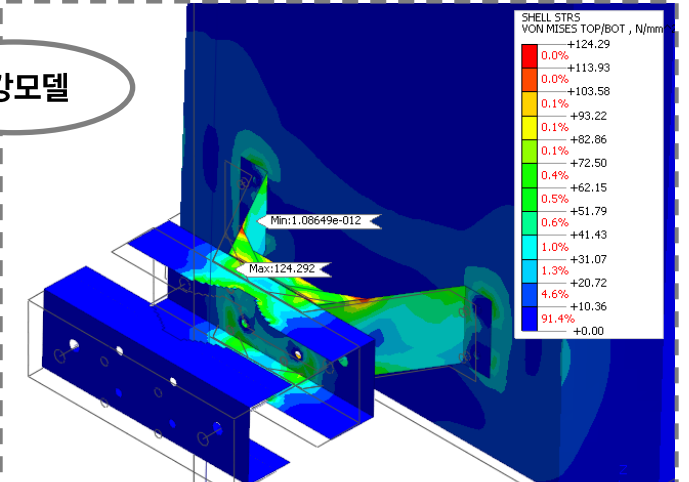
최대 발생응력 : 213.94 MPa > *165 MPa ... **N.G.**

Rib 보강

Rib 4t 추가

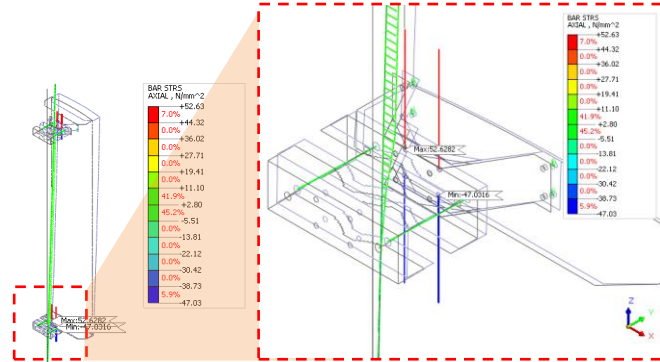


보강모델

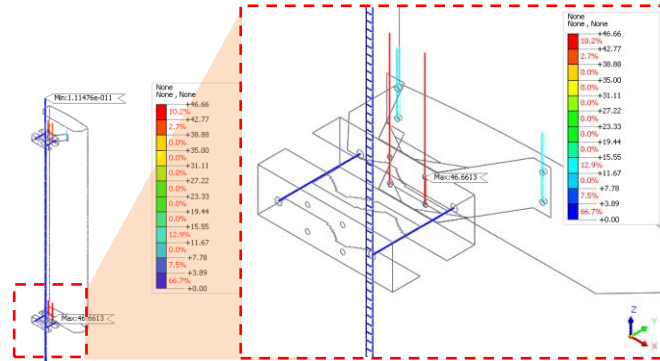


최대 발생응력 : 124.29 MPa < *165 MPa ... **O.K.**

안전계수(Safety Factor) 적용 예시 : 연결볼트 평가



최대 인장응력 : 52.63 MPa < 120 MPa ... 안전



최대 전단응력 : 46.66 MPa < 90 MPa ... 안전

*KDS 14 30 25 : 강구조 연결 설계기준 (허용응력설계법)

4.4 리벳 및 볼트

4.4.1 리벳 및 볼트의 허용내력

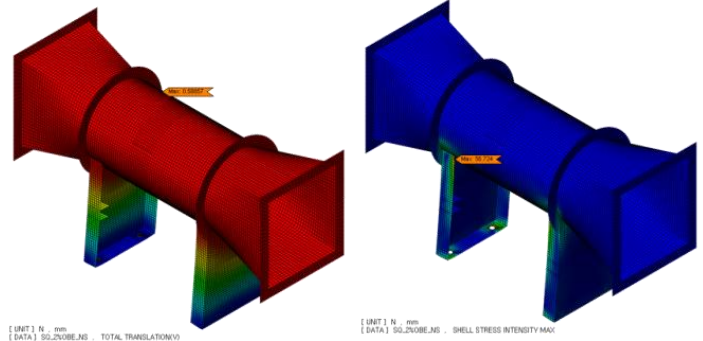
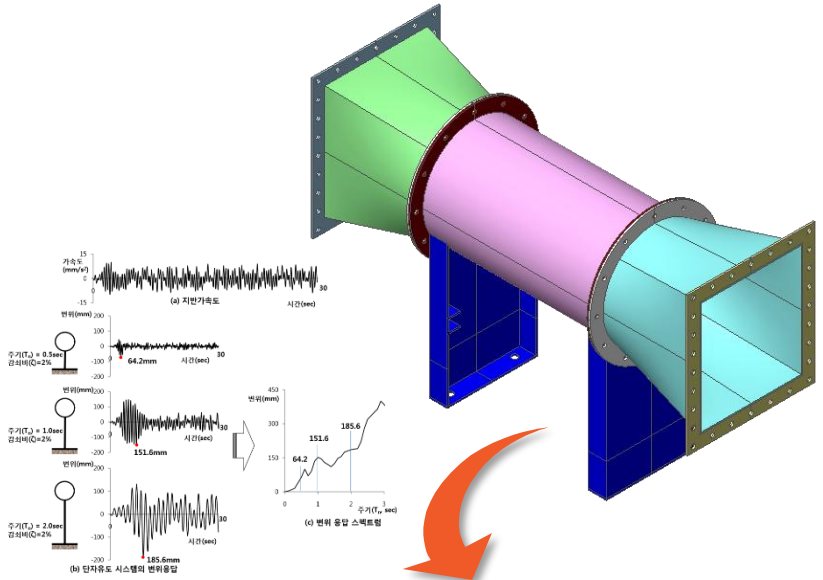
(1) 리벳 및 볼트의 허용응력

리벳 및 볼트의 허용응력은 표 4.4-1에 따른다.

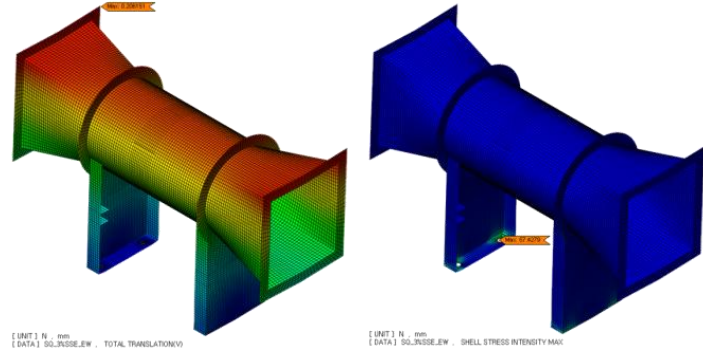
표 4.4-1 리벳 및 볼트의 허용응력 (MPa)

계 료		인 장	전 단
리벳	SV330, SV400 SBV330, SBV400	160	120
	SS275, SM275 중볼트	120	90
볼트	SS315 중볼트	140	110
	SM355 중볼트		
	SM420 중볼트	180	140
	SM460 중볼트	210	160

안전계수(Safety Factor) 적용 예시



< Max. Displacement & Stress of OBE@NS >



< Max. Displacement & Stress of SSE@EW >

Generate Design Spectrum

Design Spectrum: UBC (1997)

Seismic Coeff: Japan, Korea, China (JTJ), Automatic, KBC (2005), Data for AutoKBC (2009)

Soil Profile Type: UBC (1997)

Seismic Zone Factor (Z_s): Zones (urban)

Seismic Source Type: A

Closest Distance to Known Seismic Source (km): 10.0

Seismic Coefficients: Seismic Coefficient (Ca): 0.06, Seismic Coefficient (Cv): 0.06

Max. Period: 10 (Sec)

Add/Modify/Show Response Spectrum Functions

Function Name: UBC1997

Spectrum Data Type: Normalized Acceleration, Acceleration, Velocity, Displacement

Import: Design Spectrum

Period (sec)	Spectral Data (g)
1	0.0000
2	0.0800
3	0.1000
4	0.2000
5	0.3000
6	0.4000
7	0.5000
8	0.6000
9	0.7000
10	0.8000
11	0.9000
12	1.0000
13	1.1000
14	1.2000
15	1.3000
16	1.4000
17	1.5000

Scaling: Scale Factor: 1, Max. Value: 0 g

Damping Ratio: 0.05

Spectral Data Graph: Period (sec) vs Spectral Data

*운전조건별 ASME & AISC 설계기준 적용

TABLE I - STRESS LIMITS FOR EQUIPMENT & SUPPORTS
(EXCLUDING ITEMS ASSOCIATED WITH BUILDING STRUCTURE - REFER TO SKETCH 1)

Plant Operating Condition	Loading Combination	Stress Limits for ASME Section III Equipment and Supports (use appropriate class and subsections)		Stress Limits for Non-ASME Section III Equipment and Supports ⁴
		Active Equip.	Passive Equip.	
Service Limit A (Normal)	DWO	Service Limit A	Service Limit A	AISC Steel Construction Manual Section A5.1
Service Limit B (Upset)	DWO + OBE	Service Limit B	Service Limit B	AISC Steel Construction Manual Section A5.1
Service Limit D (Emergency /Failed)	DWO + SSE	Service Limit B	Service Limit C and D	AISC Steel Construction Manual

Plant Operating Condition	Loading Combination	Stress Value	Allowable Stress
Service Limit A (Normal)	DWO	48.1MPa	150.0MPa (0.6*Sy ^①) ^②
Service Limit B (Upset)	DWO + OBE	138.7MPa	150.0MPa (0.6*Sy) ^③
Service Limit D (Emergency /Failed)	DWO + SSE	229.4MPa	237.5MPa (0.95*Sy) ^④

NOTE
 Sy^① : Yield strength(ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II , Part D)
 0.6*Sy^② : AISC Code, 1980, Section 1.5.1.1(Page 5-40)
 0.6*Sy^③ : AISC Code, 1980, Section 1.5.6(Page 5-30)
 0.95*Sy^④ : These values are 1.6 times higher than Service A limits,

not to exceed 0.95*Sy

피로수명 평가 필요 이유

- : 설계단계에서 항복강도 이내 구조적 안전성이 확인되어도, 반복적인 하중에 대해 재료성질이 변하여 파괴가 발생 가능
- : 반복하중에 대한 제품의 수명과 연관이 있으며, 설계보다 큰 비정상 운전사항에서의 수명 예측 등에서도 활용 가능

"열 번 찍어서 안넘어 가는 나무가 없다."

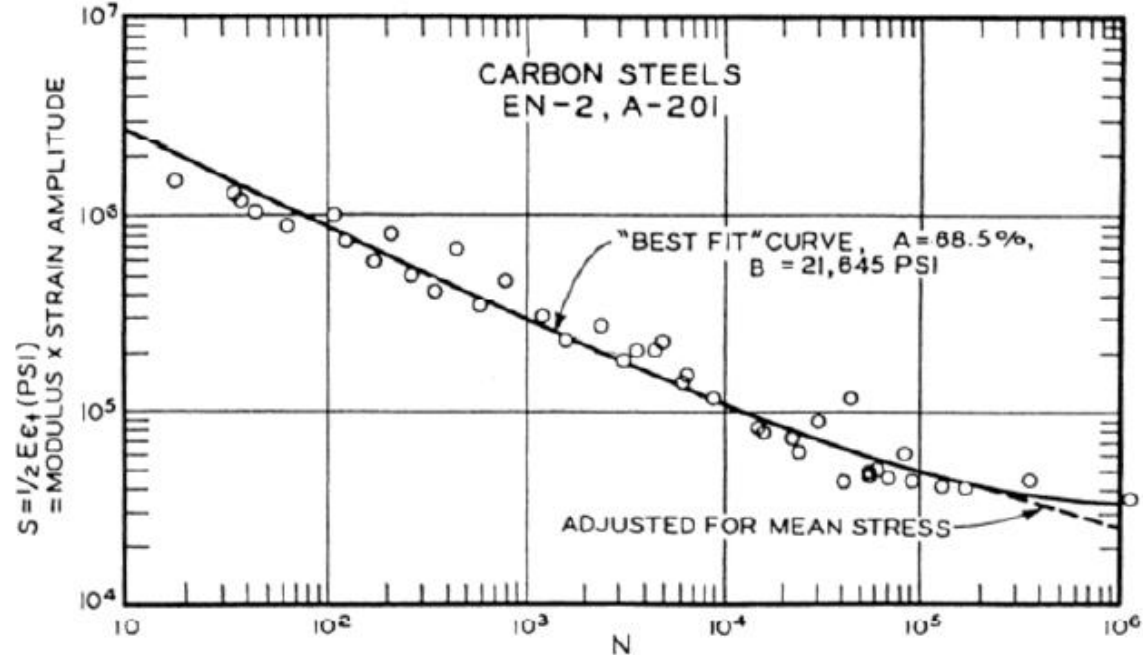
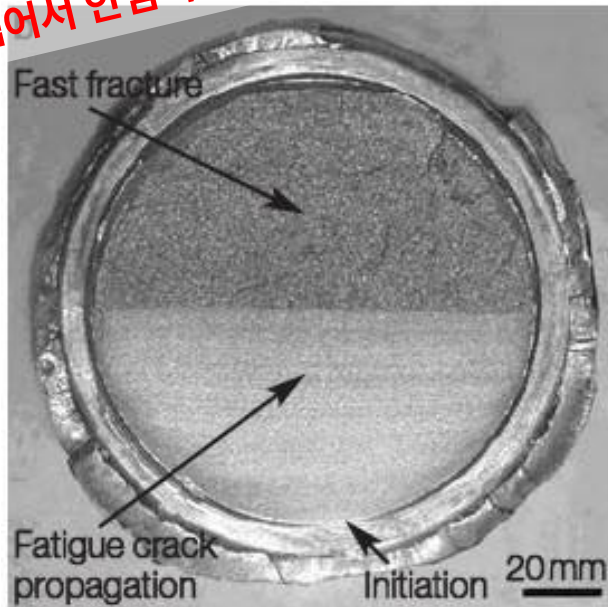
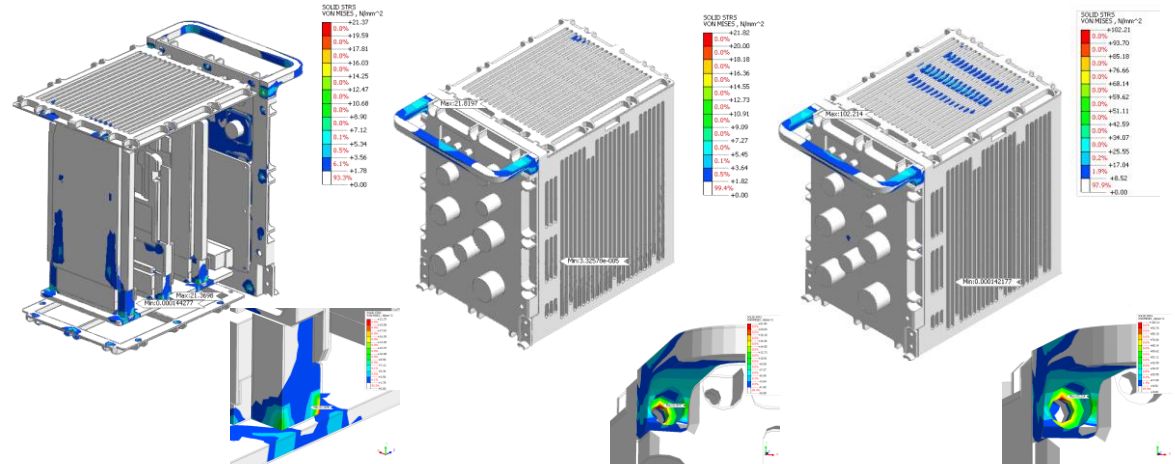
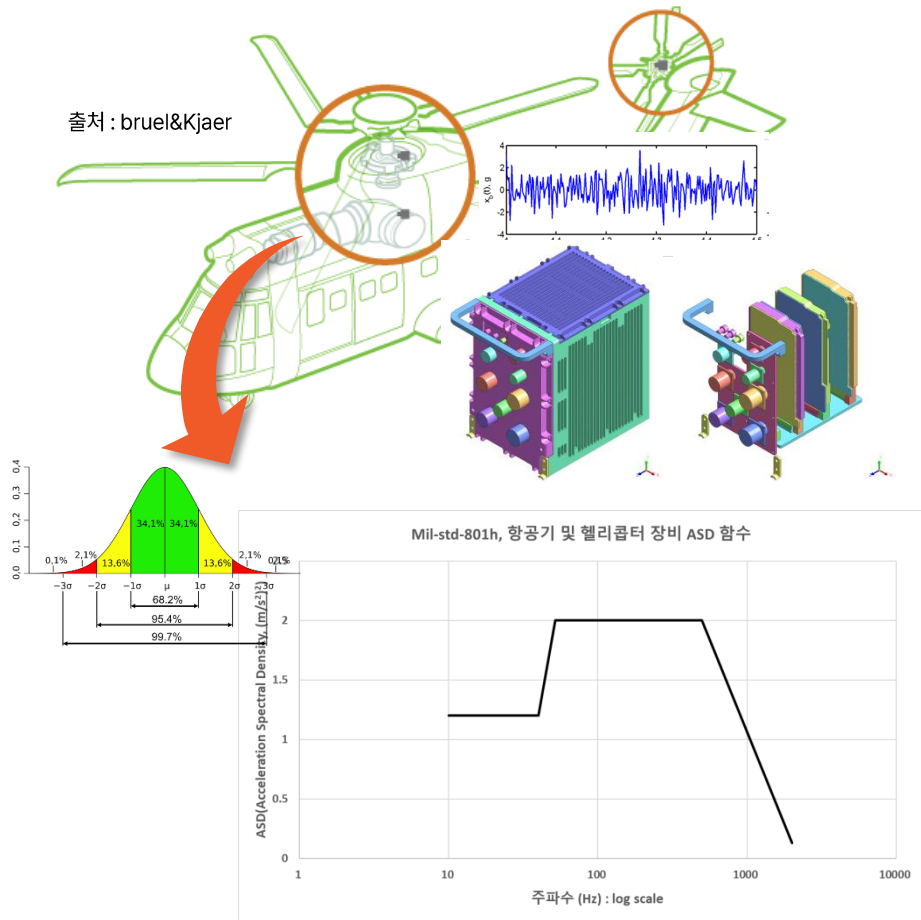


FIG. 9. FATIGUE DATA - CARBON STEELS.

피로수명 평가 활용 예시

: 헬기 상태감지시스템(HUMS) 제품 내구성 시험 모사 및 구조안전성 평가

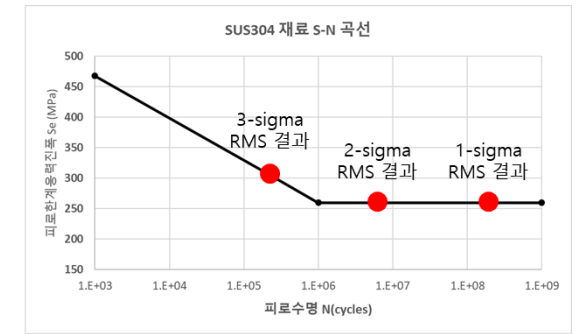


[RMS 응력결과 - X 방향]

[RMS 응력결과 - Y 방향]

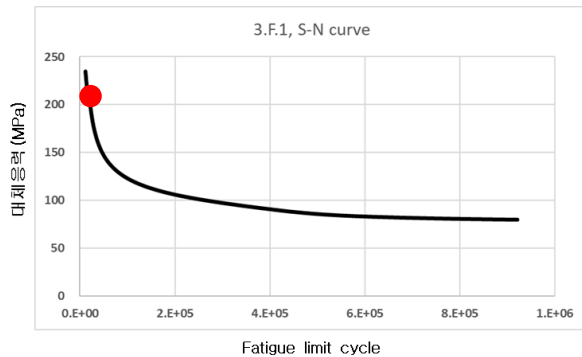
[RMS 응력결과 - Z 방향]

수준	발생확률 (%)	최대응력 (MPa)	피로수명 (Cycle)	요구수명 (Cycle)	Usage factor
1-sigma	68.27	102.21	Infinite	34,135	0.00
2-sigma	27.18	204.42	Infinite	13,590	0.00
3-sigma	4.25	306.63	212,120	2,125	0.01
Usage factor 합계 (Total)					0.01



피로수명 평가 활용 예시

: 비정상 운영하중(Operation loading)에 의한 보일러 과열기 노즐 열피로파손 문제 수명확인.



Condition	Input data	Max. stress on nozzle(외기온도 25도)	Max. stress on nozzle(외기온도 -10도)
Operating Max.	1) S/H 온도 : 366.41 °C		
	2) Gas side 온도 : 504.38 °C		
Operating Min.	3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C		
	1) S/H 온도 : 234.91 °C		
	2) Gas side 온도 : 504.38 °C		
	3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C		

외기 온도조건	최대온도 발생응력 S _{T,max} (MPa)	최소온도 발생응력 S _{T,min} (MPa)	응력편차 S _{dT} (MPa)	재료 허용응력 S _{ps} (MPa)	K _{e,k}	K _f	m	n	대체 응력 S _{alt} (MPa)	Fatigue limit cycle	Life time (years)	
											3.5회/hr	5회/hr
25도	485.82	229.42	256.4	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	217.94	1.43.E+04	0.47	0.33
-10도	545.41	287.07	212.7	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	219.59	1.40.E+04	0.46	0.32

Summary

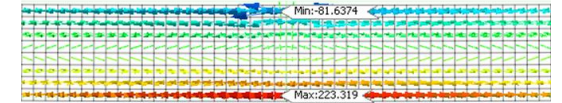
1. 변위(Displacement) 및 재료별 응력(Stress) 이해

- : 구조해석의 1차 거동은 변위로 나타나며, 크기와 방향이 적절한지에 대한 확인 필요
- : 연성(Ductile) 재료는 전단파괴가 주로 발생하며, 최대전단응력 이론(Tresca) 혹은 최대변형률에너지 이론(Von-mises)의 등가응력 성분으로 평가
- : 취성(Brittle) 재료는 인장파괴가 주로 발생하며, 최대주응력 이론(Rankine)의 주응력 성분으로 평가

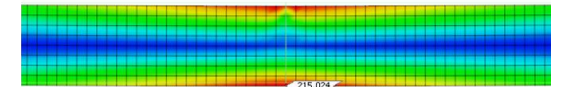
2. 해석 후처리과정 고려사항 이해

- : 제품 안전성 확보를 위한 안전계수(Safety factor), 설계기준, 피로해석 등 필요
- : 일반적으로 안전계수(Safety factor)가 반영된 설계기준을 통해 평가를 수행하며, 별도 기준이 없는 경우 제품 환경에 따라 적정값 반영하여 설계 필요
- : 반복하중에 대한 피로수명, 부재력 및 반력을 통한 연결볼트 설계 등 해석결과를 활용한 다양한 후처리 과정이 존재하며, 이에 대한 이해가 필요

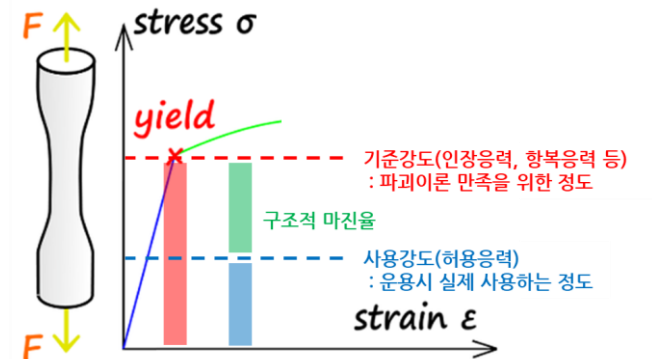
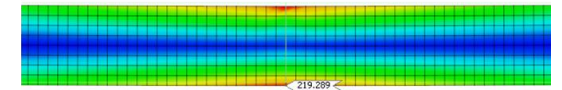
• Principal Stress



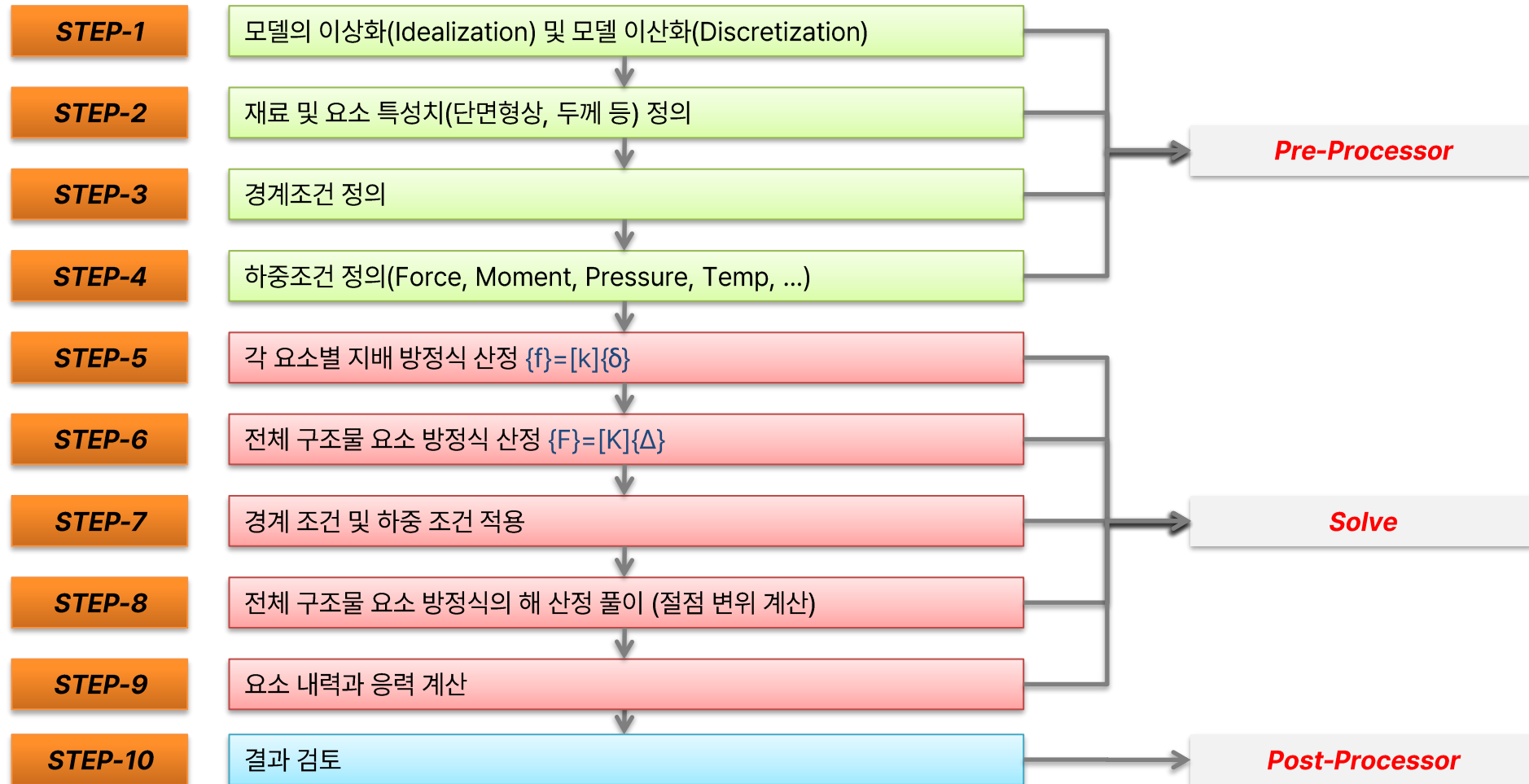
• Tresca Stress or Stress Intensity



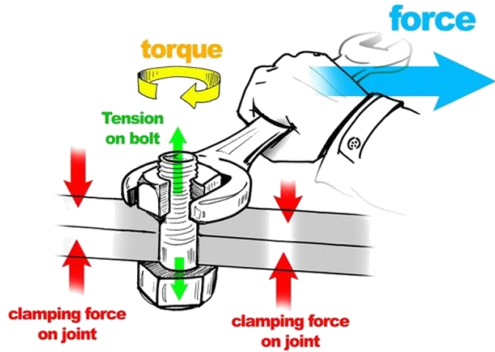
• von-Mises Stress



구조해석 프로세스

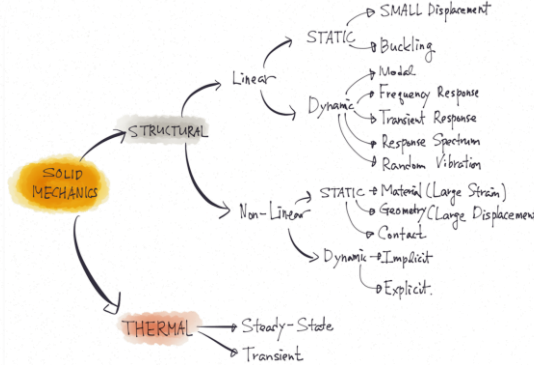


구조해석의 흐름



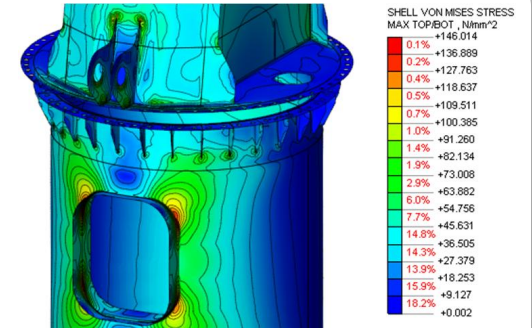
물리적 현상 정의

- 해석하고자 하는 현상에 대한 정의
- 결과로 얻고자 하는 데이터 선정



해석케이스 선정

- 해석목표에 따라 해석케이스 선정
- 해석별 필요한 데이터 확인



해석 결과 분석

- 구조물의 안전성 여부 확인
- 재료/파트 별 구조검토 항목 확인
- 평가를 위한 설계기준 적용

Thank you

15일간 모든 기능을 무료로 경험해 보세요!



CAE 지식 채널
반·디·통

CAE에 대해 더 알고 싶다면?
CAE 지식 공유 채널 '반디통'
바로가기 > <https://www.banditong.com/>

국내 기술로 개발한 CAE 제품을 한눈에!
CAE 통합 솔루션 'MTS'
바로가기 > <https://www.midasmts.com/>