

# Chapter1

# Mechanical Properties

강의명: 기계재료공학 (MFA9009)

---

정영웅

창원대학교 신소재공학부

YJEONG@CHANGWON.AC.KR

연구실: #52-212    전화: 055-213-3694

Homepage: [HTTP://YOUNGUNG.GITHUB.IO](http://YOUNGUNG.GITHUB.IO)

# Objectives

---

- 공칭 응력(engineering stress)과 공칭 변형률 (engineering strain)의 정의
- Hooke's law
- Poisson ratio
- 탄성계수 (elastic stiffness, elastic constants, elastic modulus)
- 항복 강도(yield stress, yield strength)
- 인장 강도 (tensile stress, tensile strength)
- 길이 신장률 (Total elongation)
- 실린더형 연성 재료 시편의 변형에 따른 형상 변화
- 파손된 인장 시편에 대한 길이 신장률과 단면적 감소율 산출
- 탄력 계수 및 인성의 정의와 단위
- ... more to come

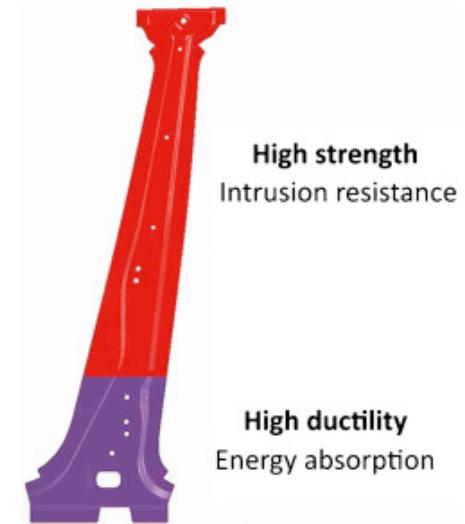
# Some background

---

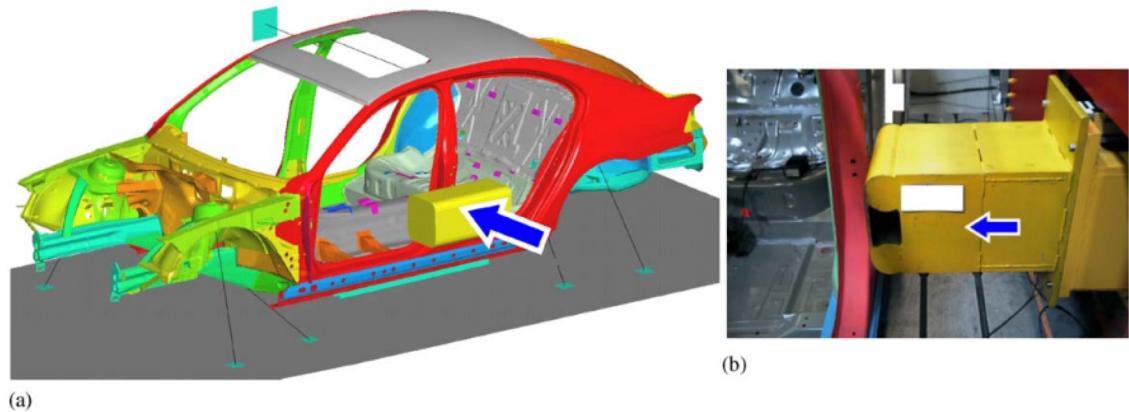
- 다양한 구조용 금속 제품 (structural metallic products)이 다양한 용도로 다양한 engineering structure에 쓰인다.
  - Alconic의 Aluminum 제품
  - Alcan의 Aluminum 제품
  - POSCO의 steel 제품
  - Hyundai steel의 제품
- Q) What engineering structure? (건축, 비행, 자동차 ... )
- Q) 금속 제품의 객관적인 성능은 어떻게 표현될 수 있을까?
- Q) 더욱 구체적으로, 금속 제품의 기계적 성능은 어떻게 측정되고 표현될 수 있을까?

# Recap: mechanical property

- Q) What is a property?
- Q) What principle is applied when obtaining a mechanical property? – stimulus and response.
- When load is applied, the shape of metal might change. (힘이 가해지면 모양이 변화)



# Roles of Government and engineers

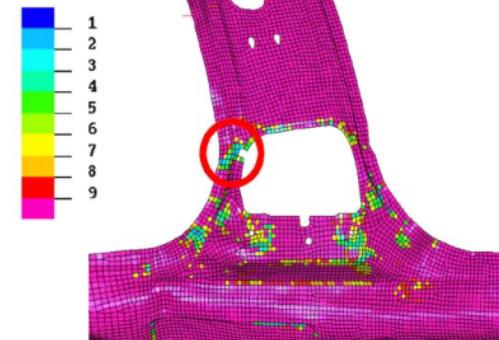


(a)

(b)



(c)



Regulations

Comply with the rules

How? With/without knowledges

Pickett et al., Int. J. Impact Eng. 30, 2004 p853-872

# Mechanical stimulus/response

Force  
Deformation

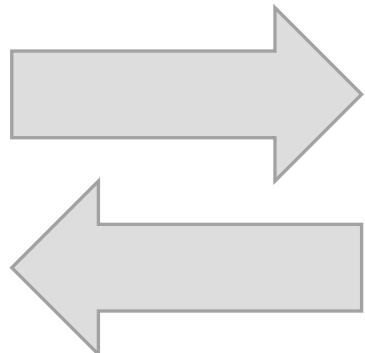
Size-dependent

Stress  
Strain

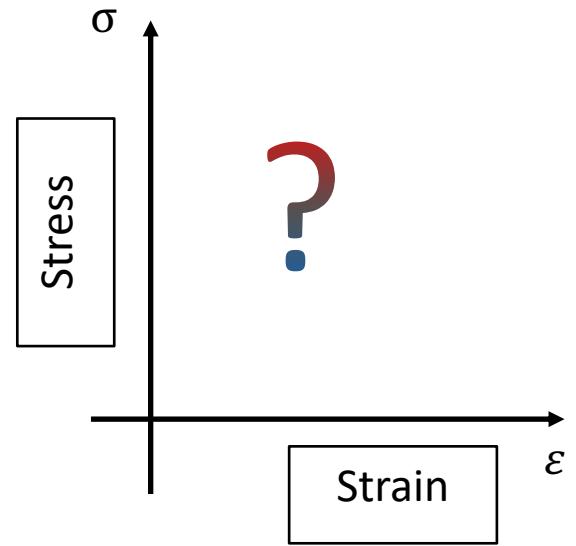
Size-independent

Stress

Strain



관계: material property



Constitutive model;  
Constitutive equation  
구성방정식

# Mechanical stimulus/response + property

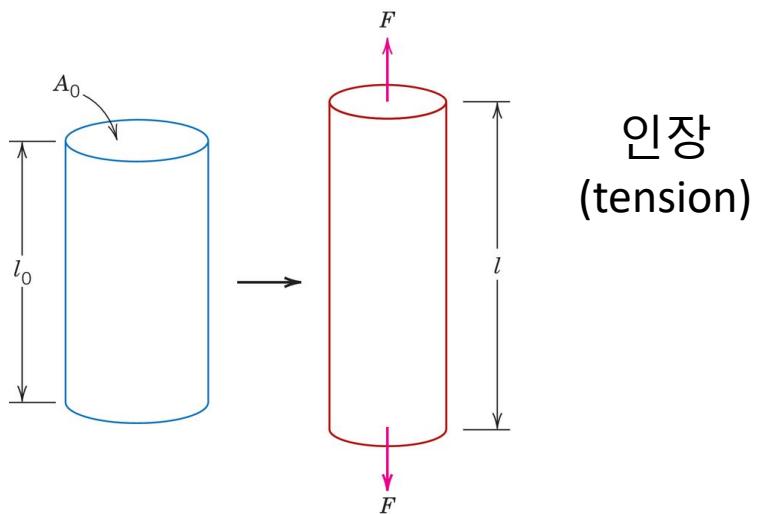
- 기계적 성능은, 기계적 자극과 그 자극으로 기인한 기계적 반응사이의 관계를 연결해주는 **연결고리**다.
  - 그러한 연결고리는 여러 형태의 '**수학적 모형**'으로 나타날 수 있다.
  - 여러분들이 다룰 수학적 모형은 주로 '선형'적이다 (일차 함수의 형태)
- 만약 기계적 자극과 반응이 선형적이라면??
  - 자극 = 성질1 x 반응 + 성질2
  - $y = ax + b$  의 형태:  $y$  와  $x$ 는 각각 반응과 자극,  $a$ 와  $b$ 는 물질의 성질 (줄여서 물성)
- 기계적 자극과 기계적 반응, 그리고 그 둘의 관계가 선형을 띠는 경우
  - 예: 금속의 탄성 – 기계적 자극이 충분히 작을 때 나타남
    - $\sigma = E\varepsilon$  ( $\sigma$ : 응력  $E$ : elastic constants (modulus),  $\varepsilon$ : 변형률)
- 기계적 자극과 기계적 반응이 매우 비선형적인 관계를 가진 경우
  - 예: 금속의 소성 – 기계적 자극이 충분히 클 때 나타남
    - $\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\gamma}_0 \sum_s \left( \frac{m:\sigma}{\tau_s} \right)^{20}$  : 응력  $\sigma$ 와 소성변형률  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  is in a highly non-linear correlation (20승)
- 기계적 자극과 전기적 반응, 그리고 그 둘의 관계 (piezo electricity)
  - $\varepsilon = dE$  ( $\varepsilon$ : strain,  $d$ : piezoelectricity constants;  $E$ : electric field)

# notations

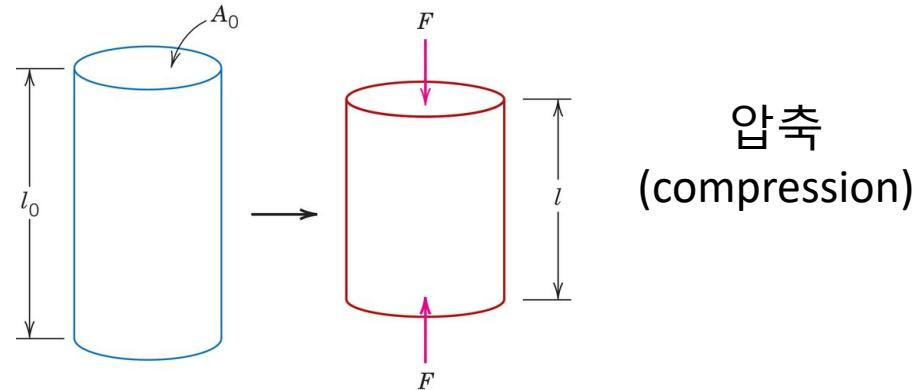
---

- 변형률은 주로 Greek letter  $\varepsilon$ , 혹은  $\epsilon$  (엡실론)으로 나타낸다.
  - $\varepsilon$ 을 진변형률,  $\epsilon$ 을 공칭변형률로 구분하는 경우도 있으나, 우리 강의에서는 따로 설명되지 않은한  $\varepsilon$ 을 구분하지 않고 변형률로 간주하겠다. \*간혹  $e$  기호를 사용하기도..
- 응력의 경우  $\sigma$  (sigma, 시그마)로 표현하겠다.
  - 마찬가지로 공칭과 진응력이 존재한다. 때에 따라  $\sigma^{engi}$  와  $\sigma^{true}$  등의 윗첨자 (superscript)를 사용하여 구분하겠다.
- 탄성 계수들
  - $E$ 와  $G$ 를 각각 (압축/인장) 탄성 계수와 전단 탄성 계수로 구분하여 사용하겠다
  - $\nu$  를 푸아송 비 (Poisson ratio)
- $\sigma^Y$  : yield stress (strength)는  $Y$  윗첨자를 사용하여 나타내겠다.
- $\epsilon^Y$  (혹은  $\varepsilon^Y$ ): yield point 에 해당하는 변형률
- $\sigma, \tau$  : 압축/인장 응력 성분 (normal stress component) 그리고 전단 응력 성분 (shear stress component)을 구분할 때 사용
- $\epsilon(\varepsilon), \gamma$ : 압축 인장 변형률 성분 (normal strain component) 그리고 전단 변형률 성분 (shear strain component)을 구분할 때 사용하겠다.

# 구조물에 작용하는 하중의 종류

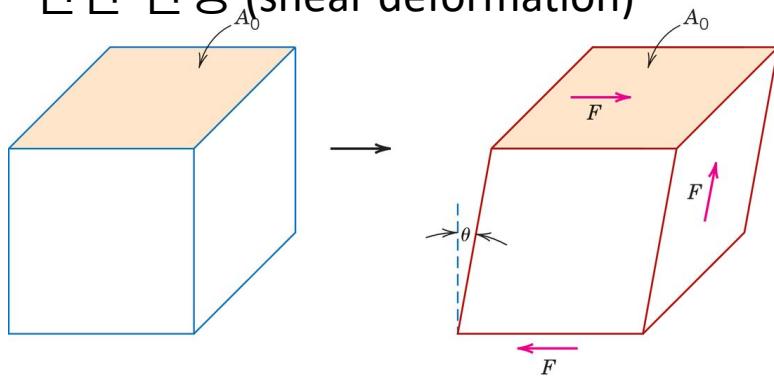


인장  
(tension)

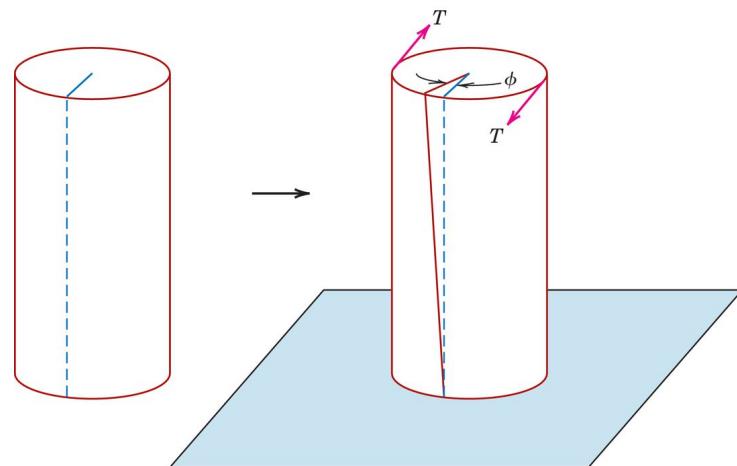


압축  
(compression)

전단력 (shear force)에 의한  
전단 변형 (shear deformation)



토크에 의한 비틀림 변형

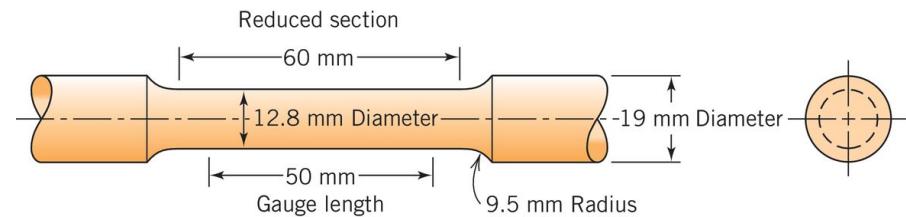


# Tension tests

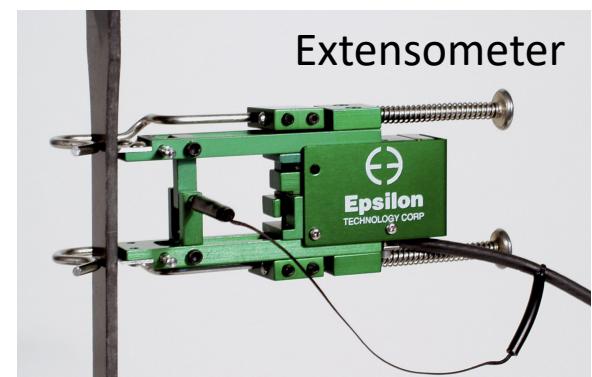
- (Uniaxial) tension test: the most common mechanical stress-strain test performed in **tension** (인장)
- Dogbone 모양의 시편 (봉상, 혹은 판상)
- 시편(specimen)은 주로 파괴(fracture)가 발생할 때까지 당겨진다.
- Load-cell: 시편에 가해진 force를 측정
- Extensometer: 시편의 길이 (elongation) 변화를 측정



Tensile tester



Load-cell



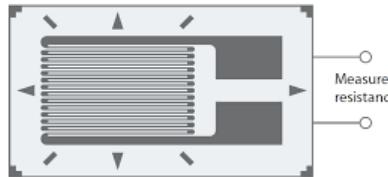
Extensometer

# Measuring strains

Measuring Relative motion of two points



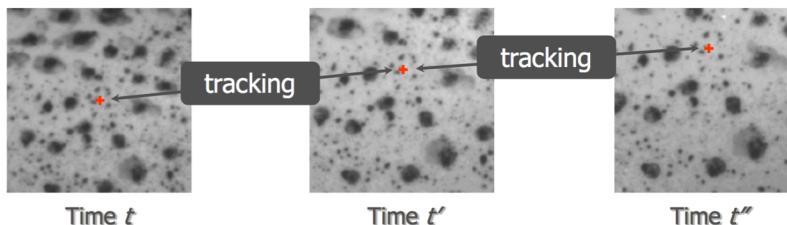
Strain pertaining to a smaller area (point)



Strain gauge

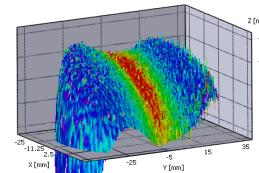


Strain field measurement (2D area)

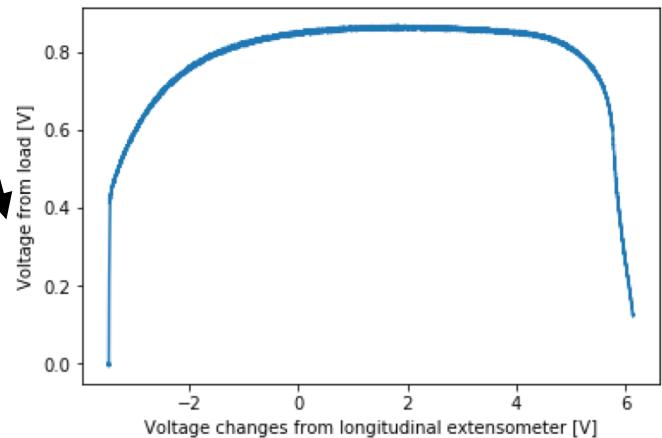


Digital image correlation

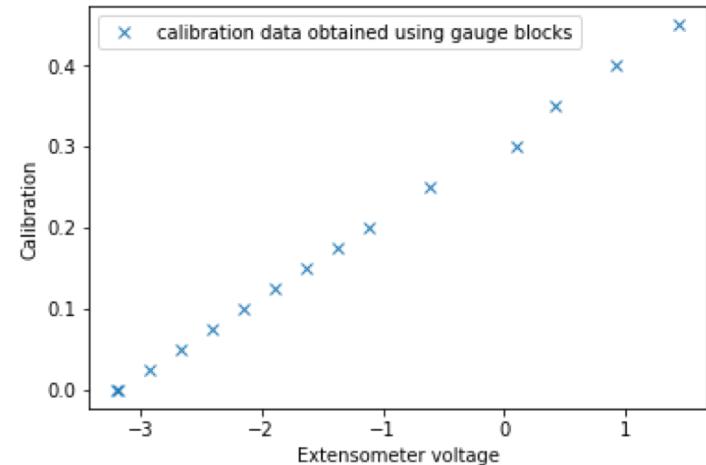
Mechanical extensometer and gauge blocks



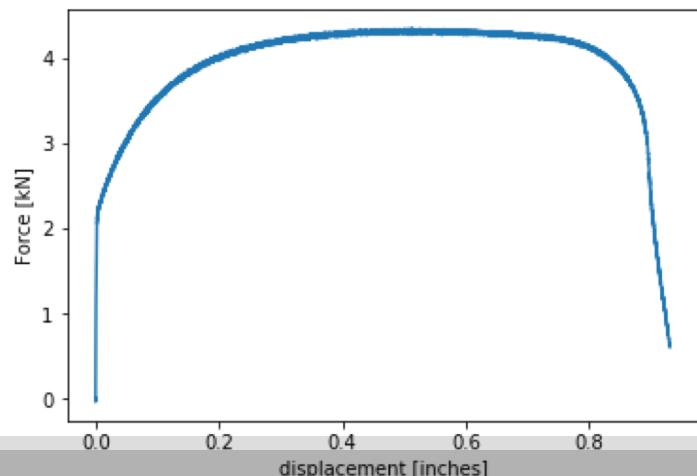
# Tension tests



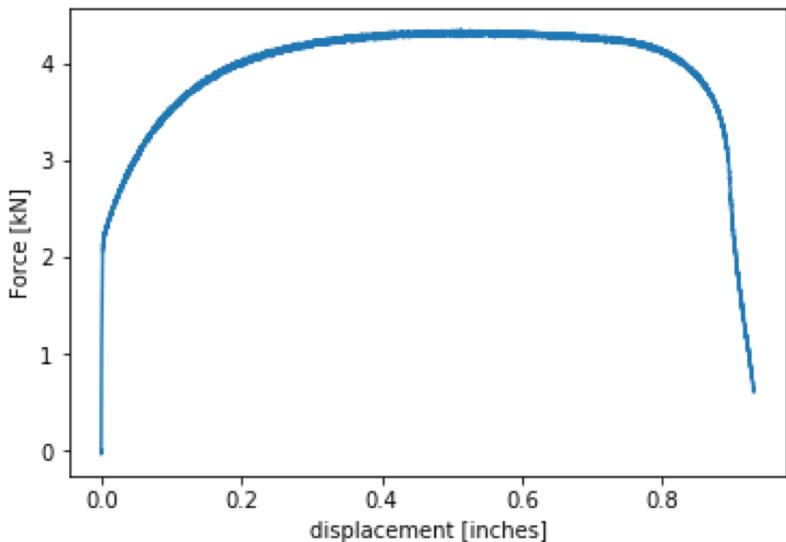
## Calibration



Load cell과 extensometer는 전기적 신호를 준다. 전기적 신호와 실제 physical quantity (Force 혹은 길이 변화)는 calibration을 통해 변환 시킨다.



# Tension tests



- **Summary:**
  - Load-cell과 extensometer로 전기적 신호를 받아왔다.
  - Load-cell과 extensometer의 calibration 데이터를 통해 Force와 displacement로 변환하였다.
- Force and displacement는 시편의 크기에 따라 변한다. 따라서, 기계적 특성을 설명하는데 적절치 않다.
- 시편의 크기에 무관한 물리량으로 바꾸는 것이 필요하다.

- 이렇게 시편의 크기(기하학적 요소)를 최소화 (혹은 완전히 제거) 하기 위해서 응력과 변형률을 사용해야 한다.
- Force와 displacement를 각각 응력과 변형률로 전환해야 한다.

# 기하학적 요소 감소 (공칭 응력/변형률)

- 시편에 걸린 하중의 기하학적 요소를 \*줄이는\* 가장 간편한 방법으로 engineering stress (공칭 응력)을 사용할 수 있다.
- 시편이 보여주는 모양의 변화에서 기하학적 요소를 \*줄이는\* 가장 간편한 방법은 engineering strain (공칭 변형률)을 사용할 수 있다.

$$\sigma^{\text{engi}} = F/A_0$$

F: 시편에 가해진 하중 (힘, 주로 N 혹은 kN 단위)

$A_0$ : 하중이 가해지기 전의 시편 단면적 (주로  $m^2$  단위)

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$l_0$ : 시편에 하중이 가해지기 전의 길이

$l_i$ : 순간순간 변한 길이

변형률은 단위가 없다. (길이 단위가 상쇄되어 없어진다)  
다만 공칭 변형률에 100을 곱해 %로 나타내기도 한다.

- 힘과 시편의 길이 변화 대신, 공칭 응력과 공칭 변형률을 사용함으로써 시편의 기하학적 요소를 어느정도 줄이는 효과를 얻을 수 있다.

# 기하학적 요소 제거 (진응력/진변형률)

- 시편에 걸린 하중의 기하학적 요소를 \*제거\*하는 방법으로 **true stress (진응력)**을 사용할 수 있다.
- 시편이 보여주는 모양의 변화에서 기하학적 요소를 \*제거\*하는 방법으로 **true strain (진변형률)**을 사용할 수 있다.

$$\sigma^{\text{true}} = F/A$$

F: 시편에 가해진 하중 (힘, 주로 N 혹은 kN)

A: 하중이 가해지는 시점에서의 시편 단면적 (주로 m<sup>2</sup> 단위)

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

l: 시편에 하중가해지는 시점에서의 길이

dl: 하중이 가해지고 나서 매우 짧은 순간에 발생한 길이 변화 (infinitesimal)

dε: 하중이 가해지고 나서 매우 짧은 순간에 발생한 변형률 (infinitesimal)

- 위 진변형률은 순간순간 발생하는 변형률의 '변화량'을 사용하여 정의된다. 모양(길이) 변화가 발생하는 동안 나타난 진변형률 값을 더하면(적분) 모양 변화가 끝난 후(혹은 하중이 걸린 후)의 진정한 변화량을 얻을 수 있다. 여기서 진정한 변화량이란, 시편의 길이 형태 등 기하학적 요소가 완전히 제거된다는 의미.

$$\varepsilon^{\text{true}} = \int_{l_0}^{l_1} d\varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{1}{l} dl = \int_{l_0}^{l_1} d \ln(l) = \ln(l_1) - \ln(l_0) = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) = \text{ln}(1 + \epsilon^{\text{engi}})$$

# 진변형률과 공칭 변형률 비교 (인장)

- 앞서, 공칭 변형률은 기하학적 요소를 '감소' 시키는데 그치는 반면, 진변형률은 기하학적 요소를 '제거'할 수 있다고 하였다. 다음의 예제로 그 둘을 비교하여 보자.

공칭 변형률:  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

진변형률:  $\varepsilon = \ln(1 + \epsilon)$

초기 시편  
길이가 10 mm

봉상의 길이가  
12 mm 가 되었다.

봉상의 길이가  
15 mm 가 되었다.

Step 0

Step 1

Step 2

$$\epsilon = \frac{12mm - 10mm}{10mm} = 0.2$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = 0.1823 \dots$$

$$\epsilon = \frac{15mm - 12mm}{12mm} = 0.25$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = 0.2231 \dots$$

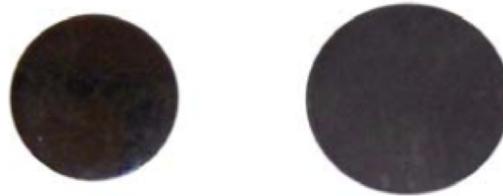
$$\epsilon = \frac{15mm - 10mm}{10mm} = 0.5$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = 0.4054 \dots$$

고찰

1. 진변형률의 경우 공칭 변형률보다 그 값이 작다 (?).
2. 진변형률의 경우 단계별로 얻어진 변형률 값의 합이 전체변형률과 같다

# 압축과 인장 (tension and compression)

- 압축과 인장 모두 작용면에 수직방향으로 힘이 작용; 그 둘의 구분은 sign으로:
  - 인장은 힘과 변형률 positive value
  - 압축은 힘과 변형률이 negative value
- 대개 인장 실험이 압축 실험에 비해 용이하다.



Disk compression test is a popular method used to measure anisotropy of sheet metals

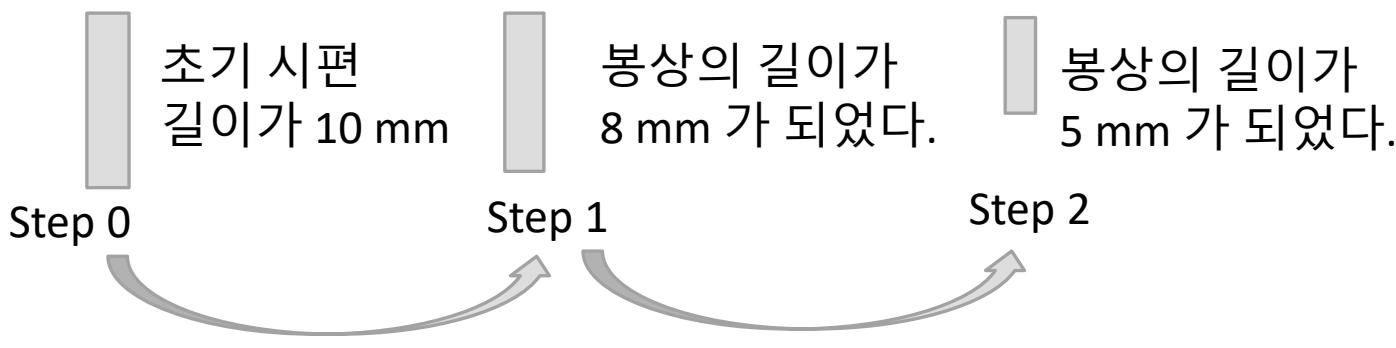
Fig. 4.4 Disk compression specimens for TWIP940 before (left) and after (right)

deformation. The left one is original, the right one is deformed.

# 진변형률과 공칭 변형률 비교 (압축)

공칭 변형률:  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

진변형률:  $\varepsilon = \ln(1 + \epsilon)$



$$\epsilon = \frac{8\text{mm} - 10\text{mm}}{10\text{ mm}} = -0.2$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = -0.2231 \dots$$

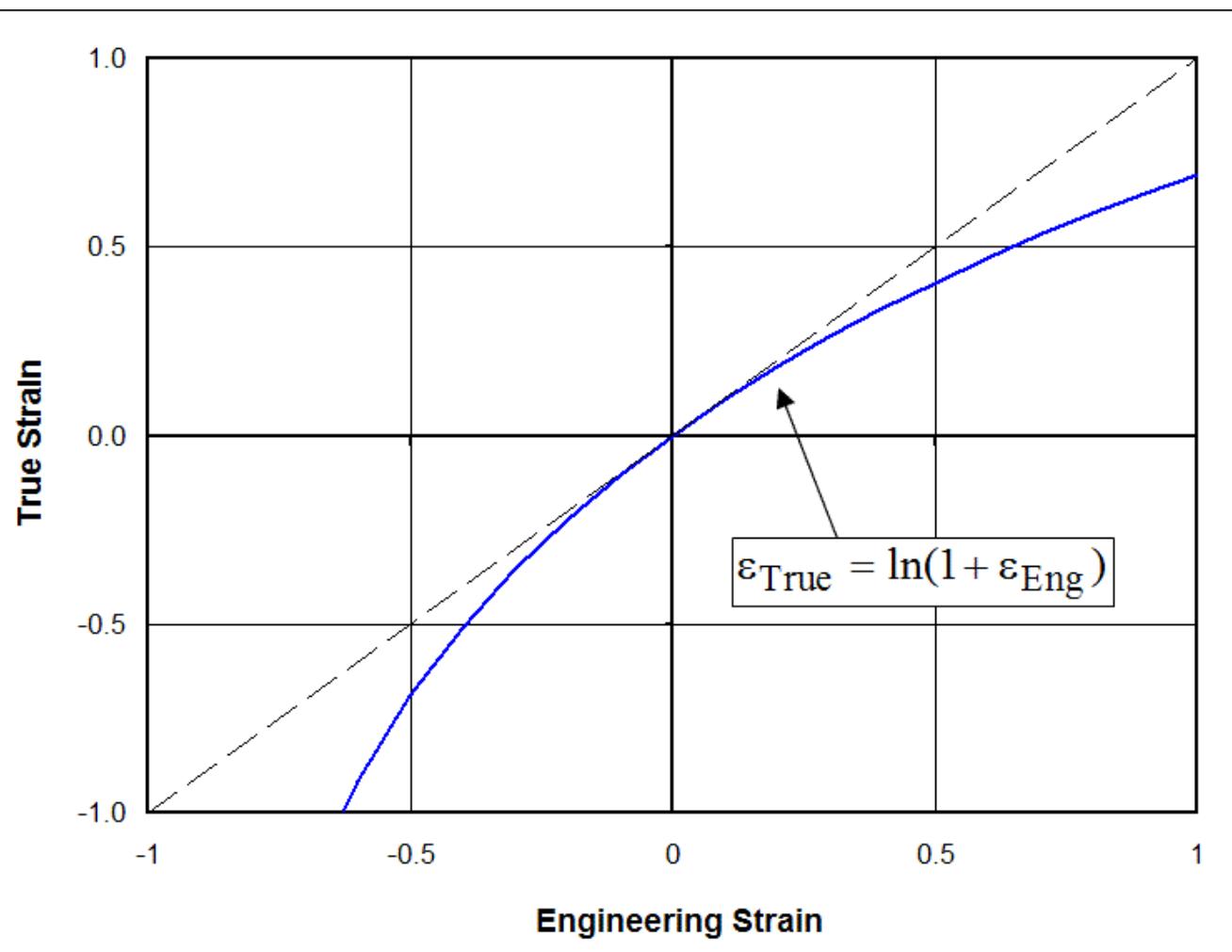
$$\epsilon = \frac{5\text{mm} - 8\text{mm}}{8\text{ mm}} = -0.375$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = -0.4700 \dots$$

$$\epsilon = \frac{5\text{mm} - 10\text{mm}}{10\text{ mm}} = -0.5$$
$$\varepsilon = \ln(1 + \epsilon) = -0.6931 \dots$$

고찰

1. 진변형률의 경우 공칭 변형률보다 작다 (?).
2. 진변형률의 경우 단계별로 얻어진 변형률 값의 합이 전체변형률과 같다.

# Compare engineering strain/true strain



[http://www.continuummechanics.org/images/truestrain/true\\_vs\\_engineering.png](http://www.continuummechanics.org/images/truestrain/true_vs_engineering.png)

# Example

---



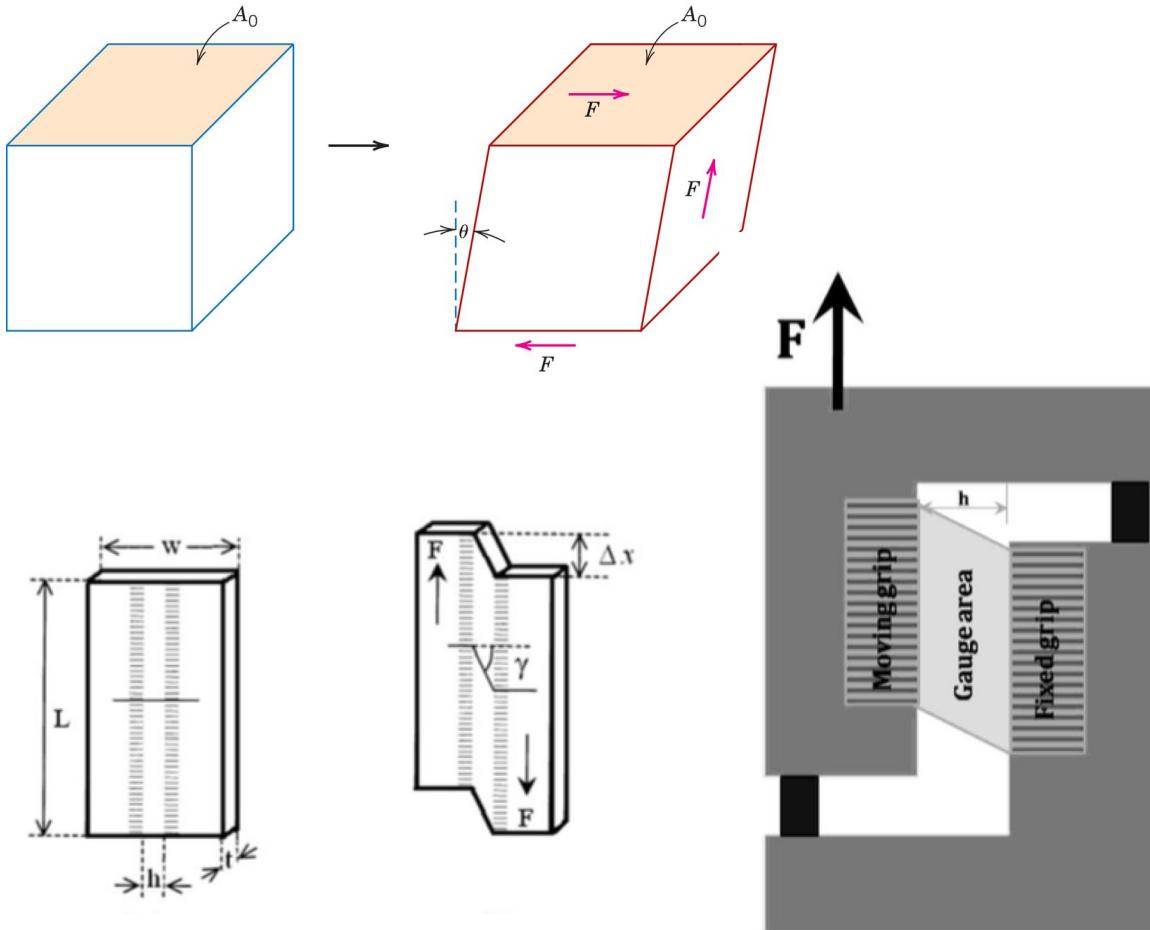
초기 시편  
길이가 10 mm

Step 0

Q1. 공칭 변형률이 -1이 되려면 해당 시편을 얼만큼의 길이로 압축하여야 하나?

Q2. 진변형률이 -1이 되려면 해당 시편을 얼만큼의 길이로 압축하여야 하나?

# 전단 (剪斷) 시험



김효정, 포항공대 석사 학위 논문 (2010)

# 전단 시험 (shear test)

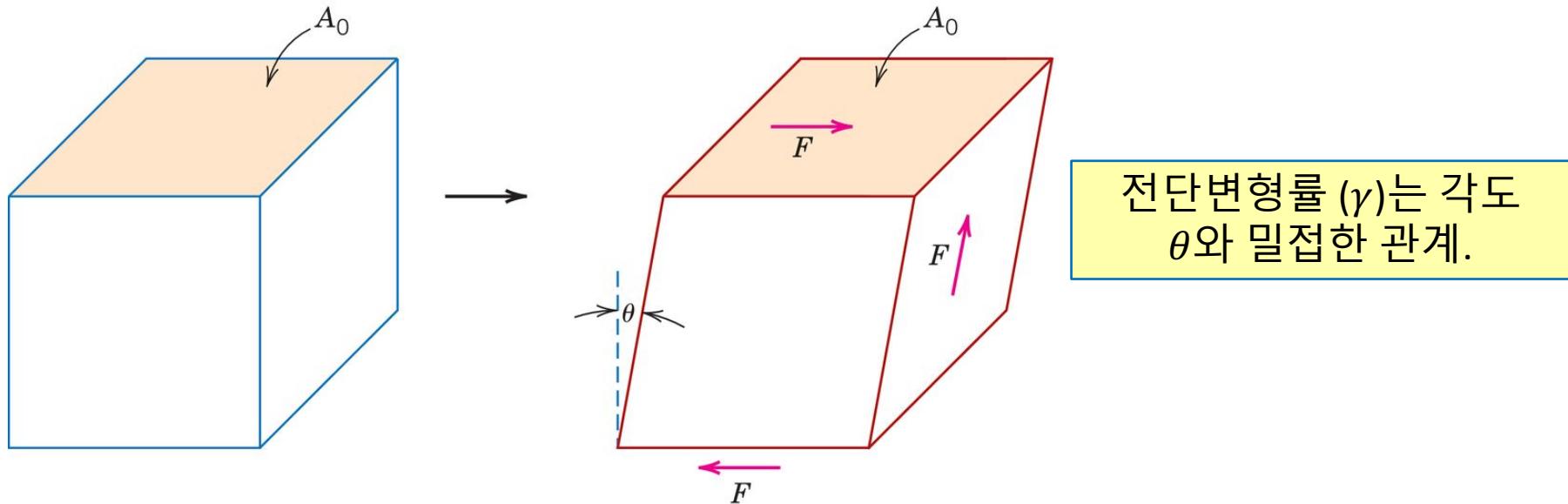
$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

$F$ : 시편에 가해진 하중 (힘, 주로 N, kN 단위 사용)

$A_0$ : 하중이 가해지기 전의 시편 단면적 (주로  $m^2$  단위)

\*전단력의 방향이 작용하는 면에 '누워' 있다.

- 인장이나 압축력(tensile or compressive force)의 방향은 작용하는 면과 '수직' 방향



전단 변형으로 물체는 회전(spin)을 일으킬 수도 있다. 하지만 이러한 회전은 순수한 '변형'이 아니다. 따라서, 정확한 변형률을 구하기 위해서는 이러한 회전을 제외시킨다.

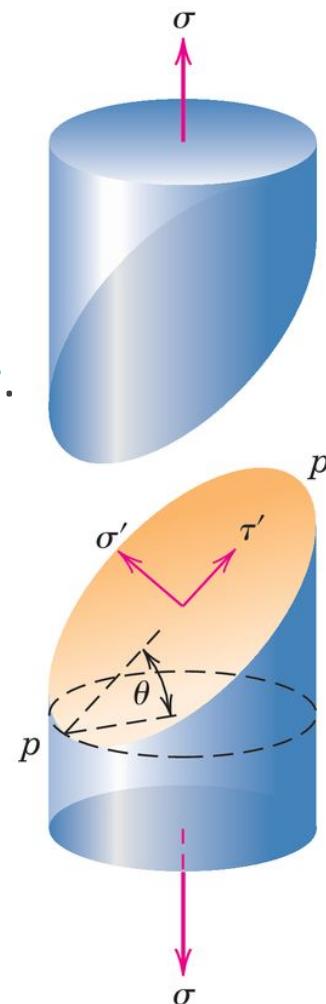
# 응력 상태의 기하학적 고려

■ 이때까지 작용한 응력들은 특별한 케이스들로 국한되어 있다

- 응력이 작용한 **면과 수직 (수직)**
- 응력이 작용한 **면과 평행 (전단)**

■ 사실 일반적인 응력 상태는 위의 **압축, 인장, 전단이 혼재한 상태이다.** 따라서 응력 상태는 수직과 전단 성분들로 나누어 분석할 수 있다. 수직, 전단 성분들은 응력 상태를 나타낼 수 있는 구성 요소(component)라 할 수 있다.

■ 예를 들어 그림 8.4의 예제를 보자.



응력은 항상 특정 '면'에 작용한다는 점을 주지할 것.

연속된 봉상내의 주황색의 가상 단면에 작용하는 응력의 상태를 살펴보자.

해당 면은 실제로 외부의 응력  $\sigma$ 가 작용하고 있다. 하지만 해당 응력은 관심면과 '수직' 이거나 '평행'하지 않다.

해당 면에 '수직'하고 '평행'한 성분을 찾아야 응력 상태를 명확히 정의할 수 있다.

Eq. 8.4a 와 8.4b 를 참조하여 면에 수직하거나 평행한 두 성분으로 나타내는 법을 익히자.

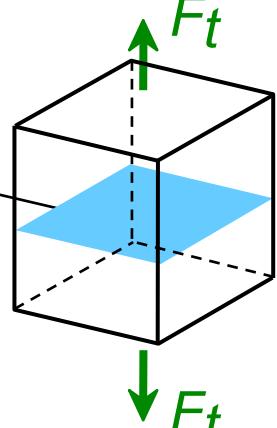
# stress state (응력상태) advanced

---

- 벡터는 세가지 성분으로 구성되어 있다.
- 응력 상태의 경우에는 9가지 성분으로 구성되어 있다.
- 9가지 성분중에는 3가지 normal components 그리고 6가지의 shear component가 존재.
- 이에 대한 활용은 차후 여러분들이 고체역학에서 배울 것이다.

# Recap: Engineering stress

- Tensile stress (인장응력),  $\sigma$ :

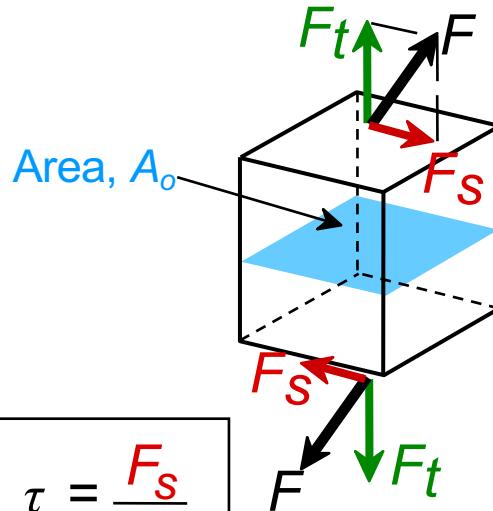


$$\sigma = \frac{F_t}{A_o} = \frac{N}{m^2}$$

Original cross-sectional area before loading

Remember the size independence of stress!

- Shear stress (전단응력),  $\tau$ :



$$\tau = \frac{F_s}{A_o}$$

∴ SI unit of stress:  
 $N/m^2$

Engineering stress는 변형전의 initial area가 기준

주어진 단면적에 작용하는 힘(vector)의 세기와 방향

단면적의 방향에 대해 다양한 방향의 힘벡터가 존재 가능: 하지만 두가지 경우로 나누어 설명 가능

즉 응력 방향이 단면적과  
1. 수직한 방향  
2. 혹은 평행한 방향  
위 두가지 경우를 가지고 나머지를 설명 가능

# 탄성 변형

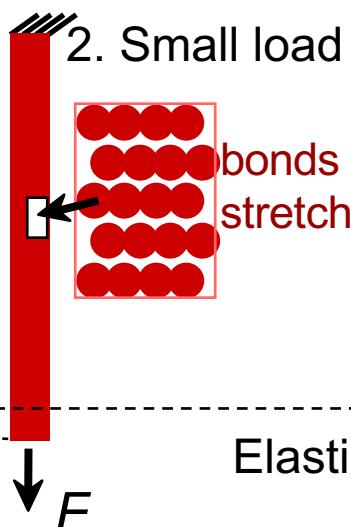
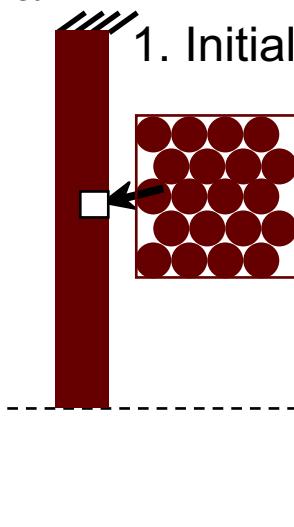
---

- 기계적 자극과 기계적 반응, 그리고 그 둘의 관계 (간단한 예: 금속의 탄성)
  - $\sigma = E\varepsilon$  ( $\sigma$ : 응력  $E$ : elastic constants (modulus),  $\varepsilon$ : 변형률)
- 위는 금속의 탄성 구간에 적용이 가능.  $E$  값은 양수. 따라서, 음의 응력을 가하면 음의 변형률이 얻어진다. 양의 응력이 점점 커질수록 양의 변형률이 점점 커진다.
- 위의 관계식은 Hooke's law로 불린다. 비례 상수  $E$ 는 다양한 이름으로 불린다:
  - Elastic modulus
  - Elastic Constants
  - Young's modulus 등
- Hooke's law의  $E$ 는 해당 물질의 탄성 구간에서의 물성 (material property)이다. 따라서 재료마다 상이한 값을 가진다.
- 교재 227쪽 탄성 변형에 대한 정의는 틀렸다. 이는 다음 장에서 더 알아보자.

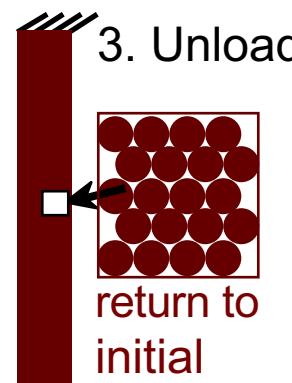
# Elasticity (탄성): thought experiment

Let's conduct a thought experiment as described below

1. Suppose you are pulling down a metallic specimen whose upper end is 'fixed'

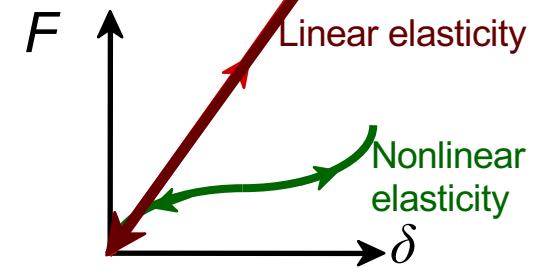


3. The pulling force decreases and eventually you let it go.



Elastic means reversible!

2. You are pulling the specimen harder and harder – meaning that the force at the lower end increase.



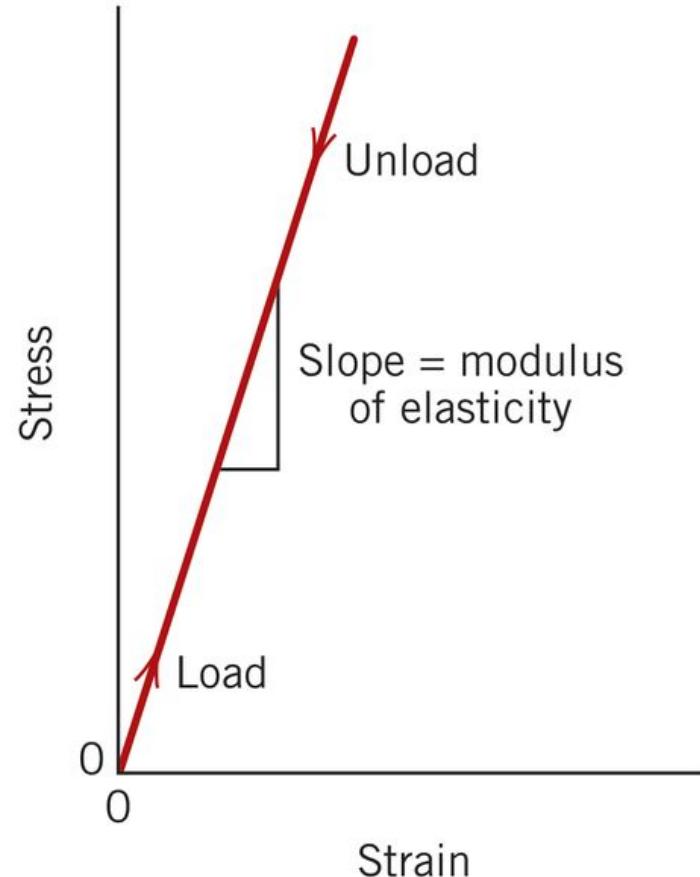
Usually metals show linear-elasticity

Non-linear elasticity is observed in polymers, rubbers

\* 응력과 변형률이 (선형) 비례성이 탄성을 의미하지 않는다. 탄성은 작용응력이 제거된 후 작용 전으로의 모습으로 '복원' 하느냐가 기준이다.

# 탄성 계수, 전단 계수

- 탄성 계수는 normal component (즉 인장 혹은 압축 응력과 변형률) 사이에서의 비례상수
- 전단 계수는 shear component (즉 전단 응력과 전단 변형률) 간의 비례상수
- 선형성이 가정되어 있다. 거의 대부분의 금속은 탄성 구간에서 선형성을 나타낸다. 즉 응력과 전단 변형률이 서로 선형 비례한다.



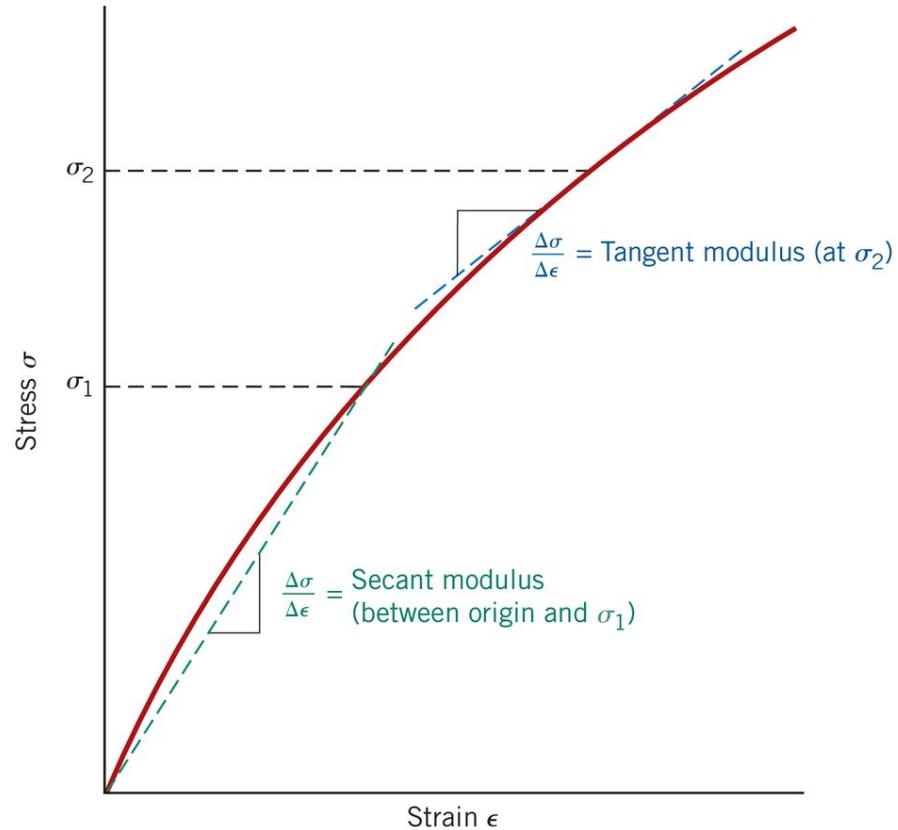
- Shear stress가 normal strain 반응을 일으킬 수 있을까?
- 반대로 normal stress가 shear strain 반응을 일으킬 수 있을까?

# 비선형 탄성 거동

- 비선형 탄성 거동을 보이는 재료들도 존재한다.

- Secant modulus: 절편이 항상 0.

- Tangent modulus: 주어진 응력커브에서 ‘순간’ 기울기



# 탄성 변형률과 원자 결합력

- 앞서 살펴본 것과 같이 탄성 구간에서는 원자간의 거리가 외부의 힘에 의해 변하며, 원자간의 결합 거리가 늘어난 상태로 볼 수 있다.

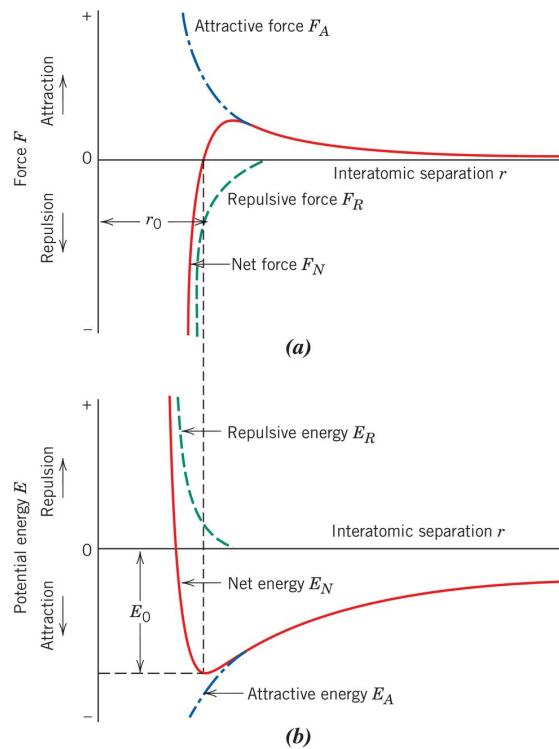
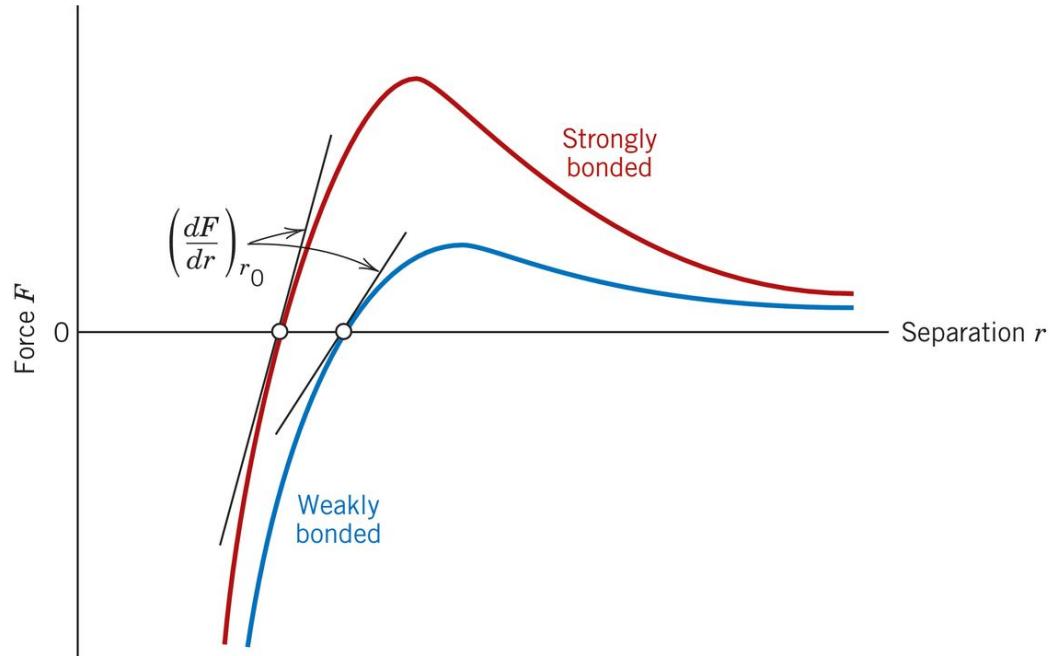
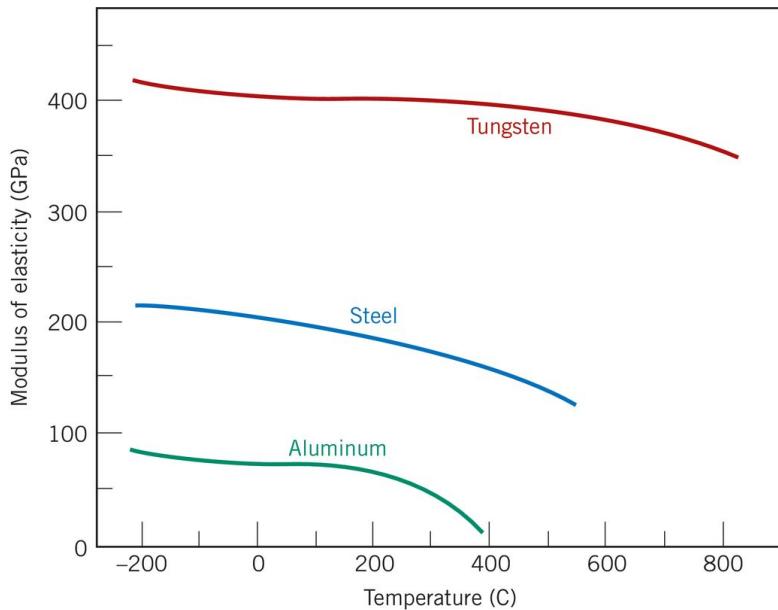


Fig. 2.10a



- 평형상태에서 원자 거리를 변화시킬 때 필요한 '힘'은 위의 그래프에서의 기울기 (이 기울기가 탄성 계수와 관계)
- 재료마다 해당 점에서의 기울기가 다를 수 있다 (각 재료의 특성)

# 온도 영향, 응력상태



온도에 따라서 탄성계수가 달라짐을 보여준다.

Adapted from K. M. Ralls, T. H. Courtney, and J. Wulff, Introduction to Materials Science and Engineering. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York.  
Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

탄성 거동은 응력상태와 상관없이 모두 발생 (압축, 전단, 인장)

선형 탄성 거동을 보이는 재료는  
간단한 선형 방정식으로 표현 가능

$$\sigma = E\varepsilon$$
$$\tau = G\gamma$$

$\tau$  (tau): 전단 응력을 나타내는 기호(symbol)  
 $\sigma$  (sigma): normal 응력 (인장 및 압축) 나타내는 기호  
 $\varepsilon$  (epsilon): normal 변형률 (인장 및 찹축)  
 $\gamma$  (gamma): 전단 변형률 나타내는 기호  
 $E$ : normal 응력 / normal 변형률 간의 선형 탄성 계수  
 $G$ : 전단 응력 / 전단 변형률 간의 선형 탄성 계수

# 의탄성 (anelasticity)

---

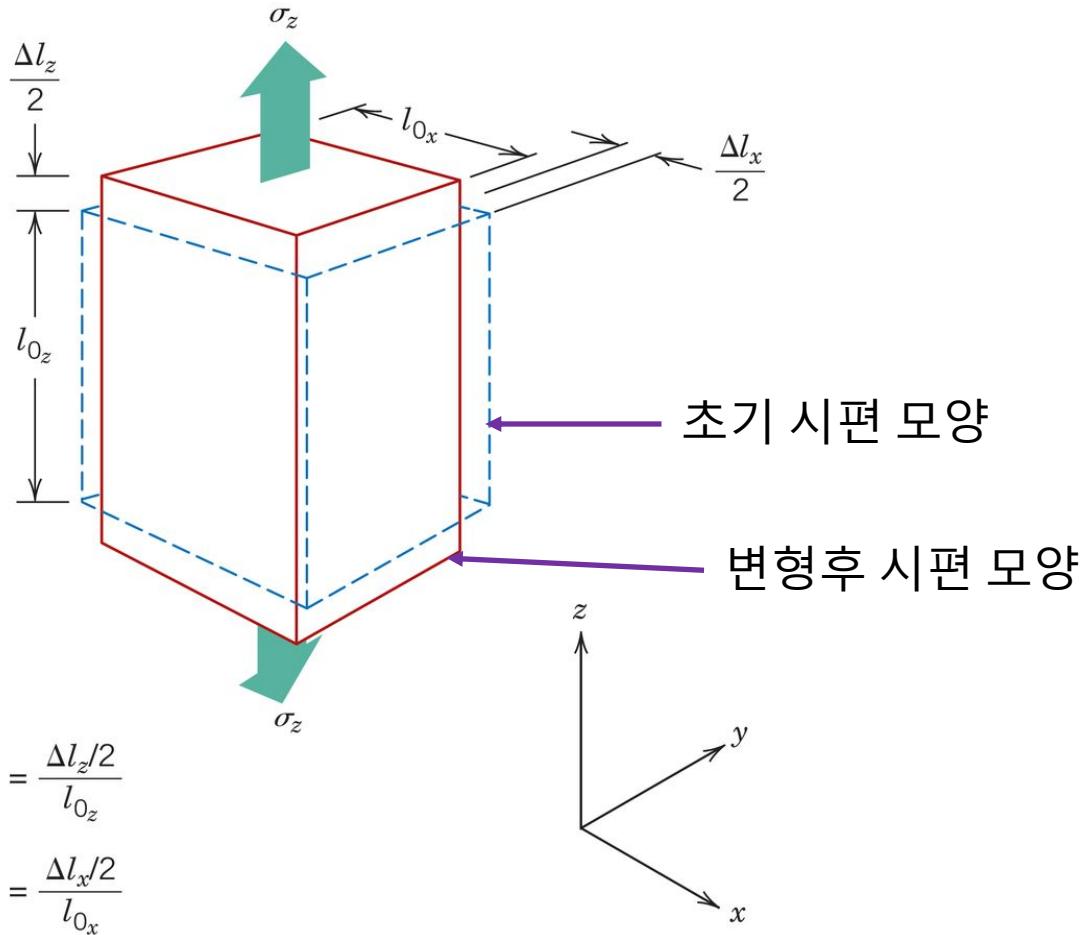
- 시간에 의존하는 탄성 변형
  - 탄성 변형에 수반되는 원자적 과정이 시간에 의존한 메카니즘에 영향을 받을 때.
  - 금속의 경우 대부분 무시할 정도 (negligible)
- 
- 예제 8.1 스스로 풀어서 Hooke's law 이해하기

# Poisson ratio (푸아송 비) ( $\nu$ ; nu symbol)

축 방향으로 작용하는 일축 normal stress 방향에 의해서 해당 힘과 같은 방향으로만 변형이 일어나는 것이 아니라 그것과 '수직'으로도 변형이 발생한다.

$$\begin{aligned}\nu &= -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \\ &= -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}\end{aligned}$$

z축 방향  
인장시  $\varepsilon_y < 0$



등방성(isotropy) 가진 경우

# Elastic isotropic

---

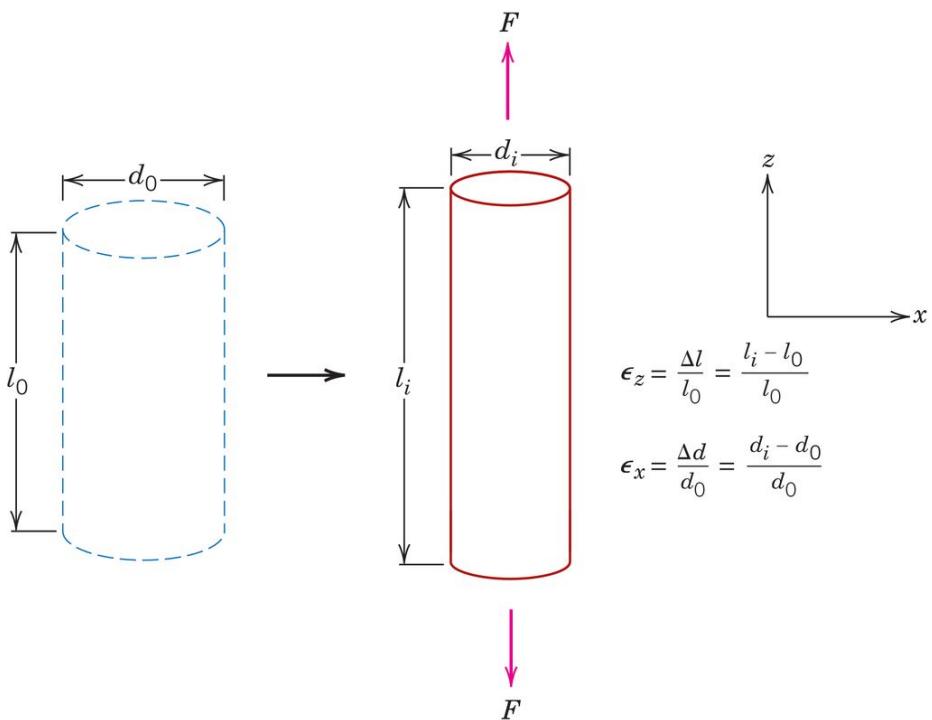
- 탄성 거동이 등방성을 띈 몇몇 금속 재료의 경우, (압축, 인장) 탄성 계수, 전단 탄성 계수 그리고 푸아송비는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

- 기계재료개론에서 다룰 대부분의 재료들은 등방성(isotropy)을 가정한다.

# 예제 8.2

- 10mm의 지름을 가진 황동 막대에  
장축 방향으로 인장 응력  
작용시켜 지름을  $2.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$  로  
수축시키는데 필요한 하중(힘)을  
구하라. 변형은 완전 탄성으로  
가정.



Metal Alloy	Modulus of Elasticity	Shear Modulus	Poisson's Ratio
	GPa	GPa	
Aluminum	69	25	0.33
Brass	97	37	0.34
Copper	110	46	0.34
Magnesium	45	17	0.29
Nickel	207	76	0.31
Steel	207	83	0.30
Titanium	107	45	0.34
Tungsten	407	160	0.28

$$F = \sigma A_0 = \sigma \left( \frac{d_0}{2} \right)^2 \pi \quad (1)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = 0.34 \quad (2)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2.5 \times 10^{-3}}{10} \quad (3)$$

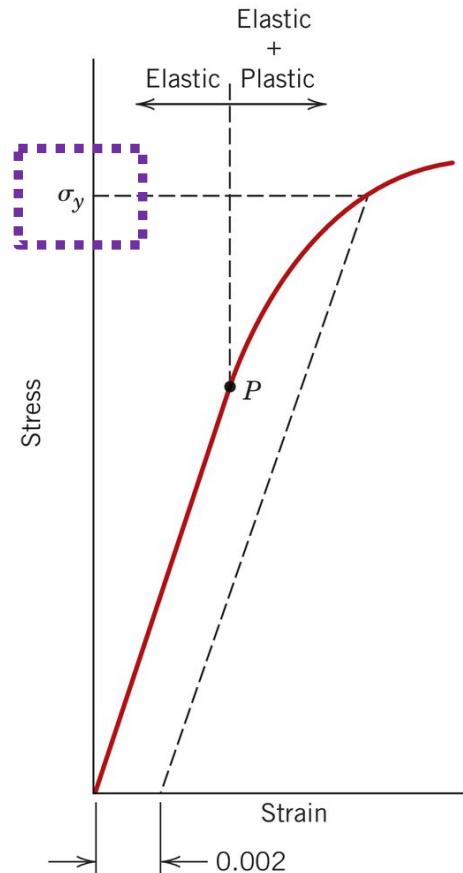
With (2) and (3), you'll get  $\epsilon_z$

Knowing  $E$  and  $\epsilon_z$  you can get the stress  
 $\sigma = E \epsilon_z$

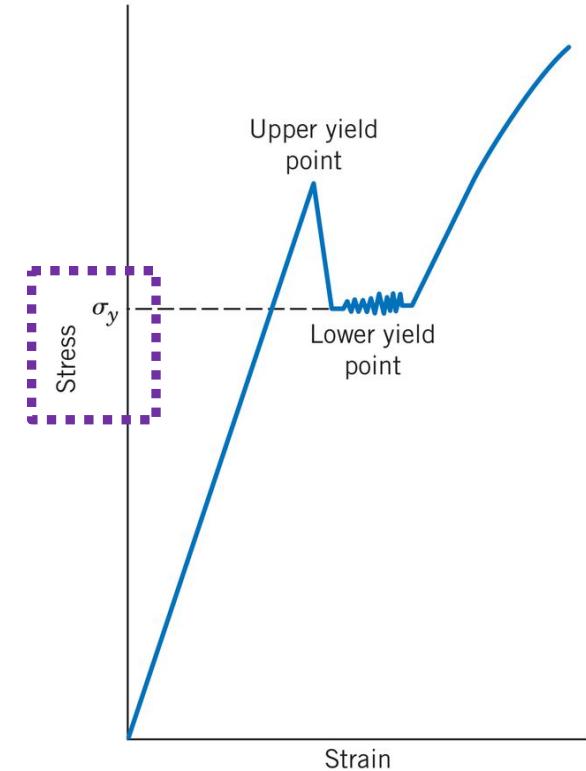
Using (1), you can obtain the force.

# 소성 변형 (plastic deformation)

- 대부분의 금속 재료는 약 0.005 정도의 변형율까지만 탄성을 유지. 이후에는 작용 응력이 제거된 이후에도 완벽히 회복되지 않는다.
- 탄성 구간에서 선형적인 관계를 보이던 응력과 변형률의 관계도 비선형이 된다.
- 따라서 Hooke's is not valid any more.
- 작용 응력이 제거된 이후에도 남아 있는 변형을 소성 변형이라 일컫는다.



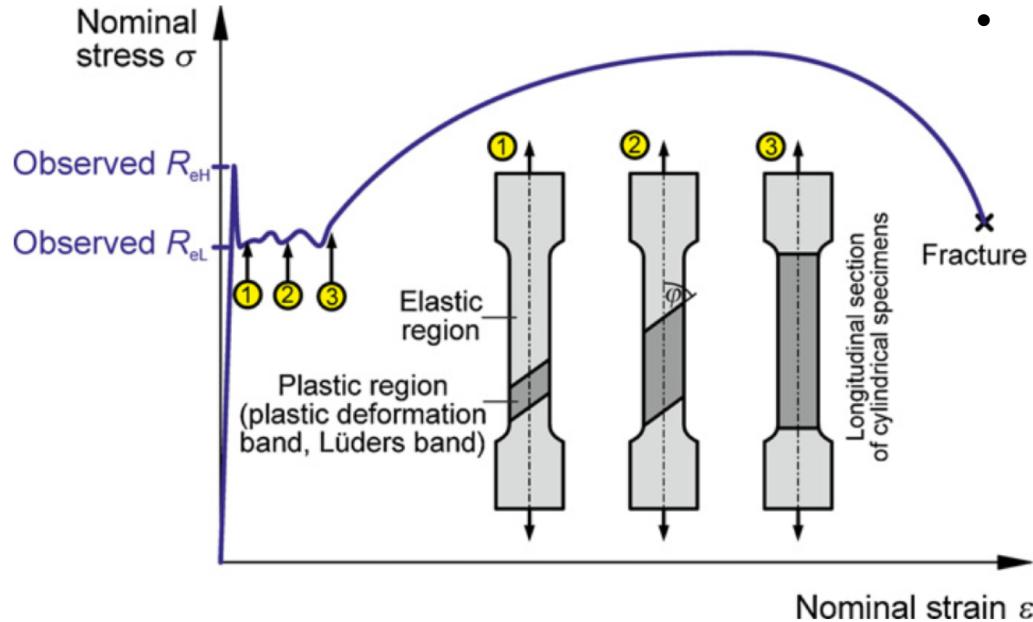
(a)  
Smooth  
transition



(b)  
Yield point  
phenomenon

- Proportional limits
- 0.002 offset (수평이동법) – 항복 강도 정의
- Yield point phenomena (more details in next slide)

# Yield point phenomenon in mild steels



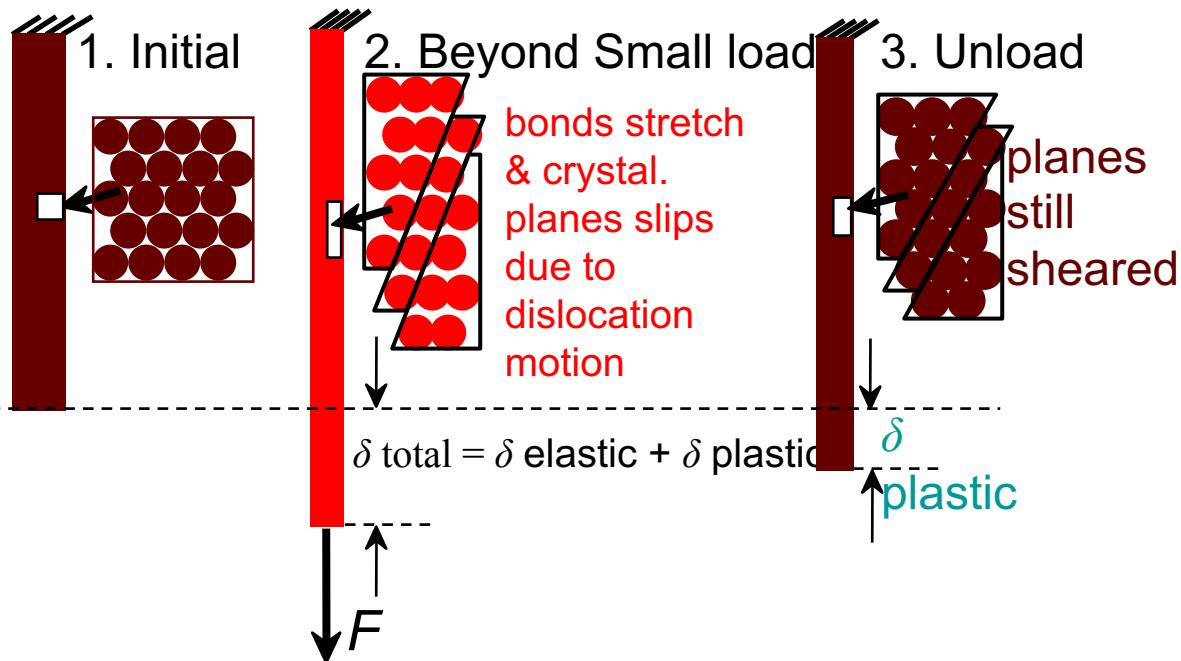
- Lüders band
- Upper and lower yield points



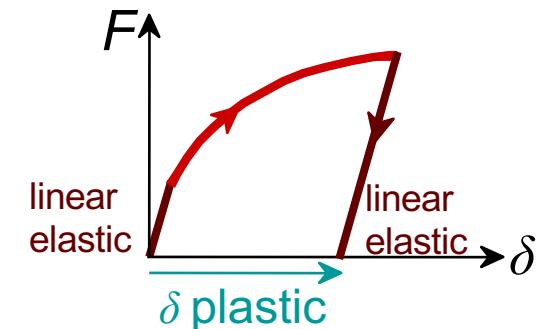
- Schwab and Ruff, Act Materialia 62, 2013 p 1798-1808
- (Luders bands image from [https://www.doitpoms.ac.uk/tplib/metal-forming-3/plane\\_stress.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tplib/metal-forming-3/plane_stress.php)) - which is originally contributed by Mike Meier, University of California, Davis

# Plasticity (소성): thought experiment

Let's conduct a similar thought experiment with an increased magnitude of force



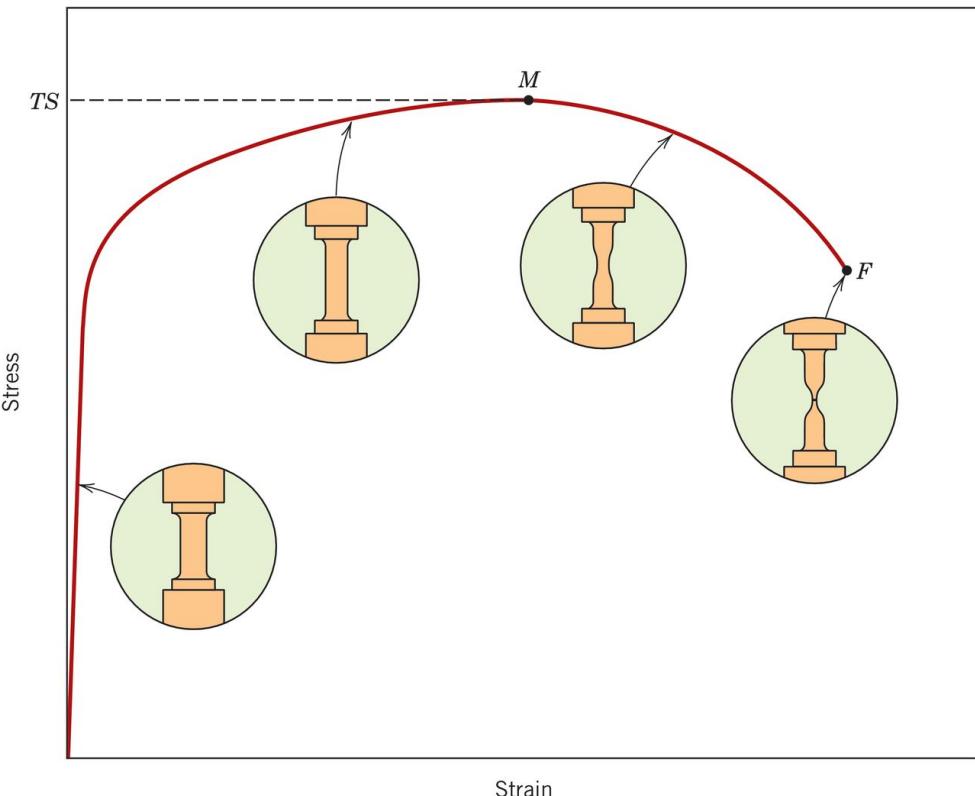
Even after the external load is removed, the material does not **fully** recover to its original shape.



Plastic means permanent!

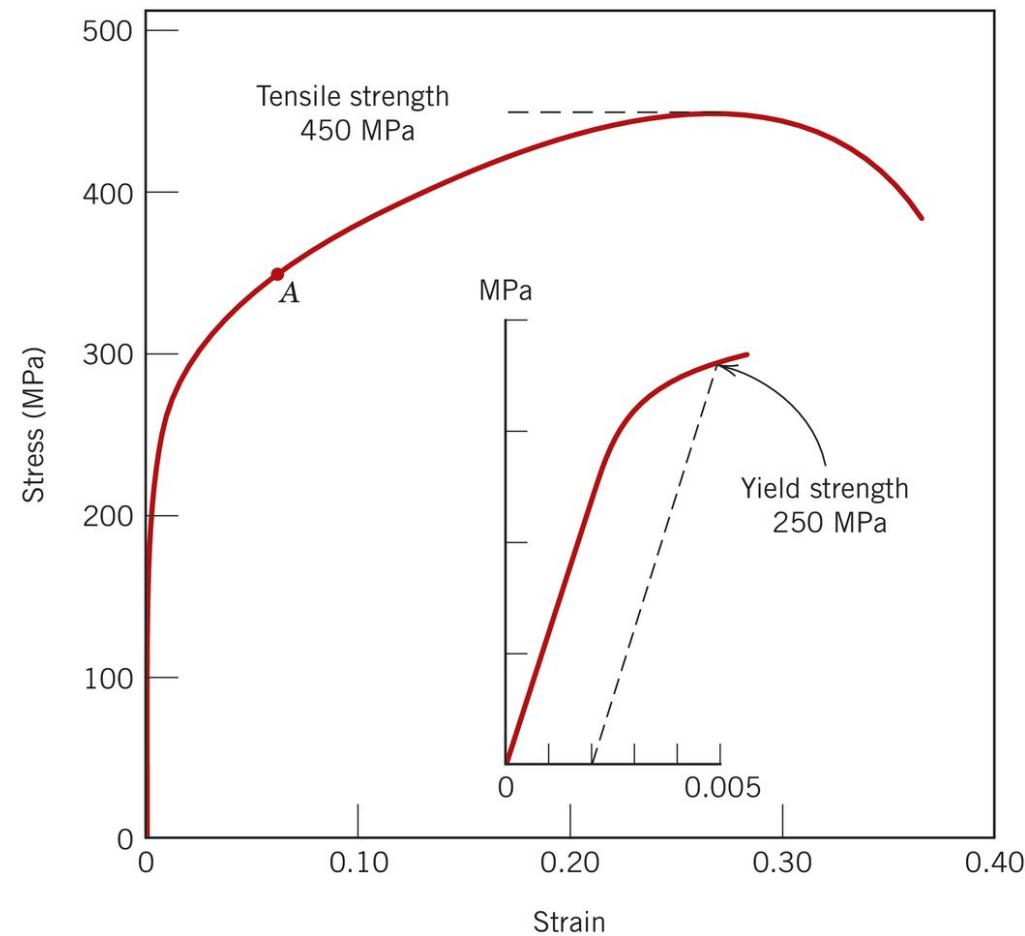
# 인장 강도 (tensile strength, tensile stress)

- 교재는 strength와 stress를 구분 – 물성의 경우 강도(strength)를 사용. 하지만 해당 과목에서는 뚜렷이 구분하지 않겠다 – since the term depends on whom you are talking to.



- 소성 변형후 계속적으로 소성 변형을 일으키기 위해서는 응력이 증가하여야 한다. 이렇게 계속적으로 소성 변형을 일으키는 응력을 유동응력(flow stress)이라 한다.
- 공칭 응력/공칭 변형률 커브에서 최대점의 공칭 응력을 TS라 한다. TS를 지나면 flow stress가 감소, 최종적으로 파괴에 이른다 ( $F$ ).
- TS까지는 균일한(homogeneous) 변형. 그이후로는 한부분에 변형이 집중되고 이로 인해, 한 부분의 폭이 수축되는 현상(necking) 발생.
- 구조재는 탄성 변형 구간내에서 주어진 하중을 견뎌야 한다.

# How to extract mechanical properties from stress-strain curve

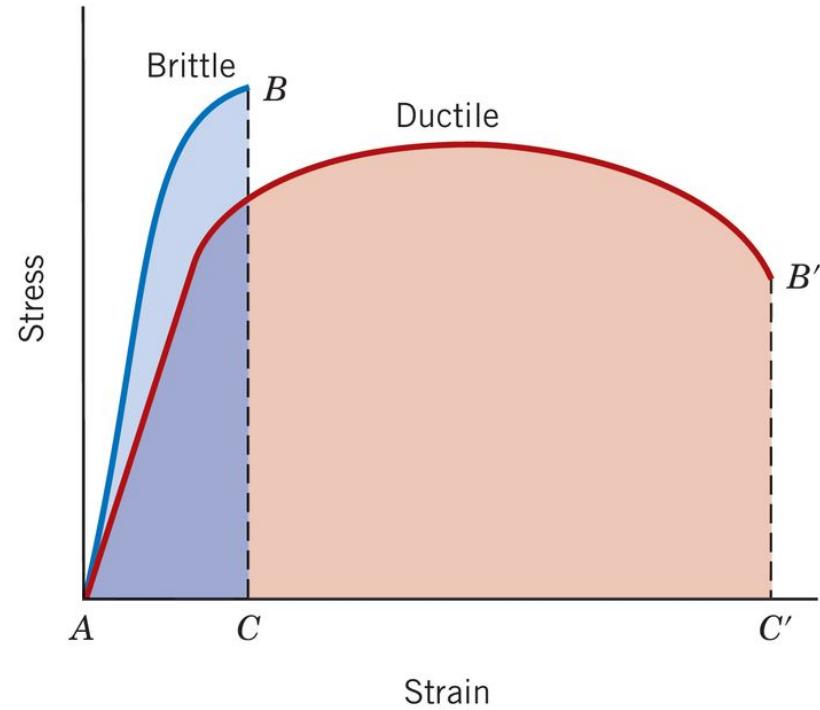


YS, TS, E.

\* You should be able to graphically illustrate how to obtain these properties.

# Ductility (연성)

- 연성은 파괴가 일어날 때까지 재료가 얼마나 소성변형 할 수 있는지를 정량화하여 나타내는 지표이다.
- 파괴까지 소성변형이 많이 발생하는 금속은 '연'하다. 무르다. 혹은 연성이 높다.
- 반대로, 파괴까지 소성변형이 거의 발생하지 않은 금속은 brittle하다 (취성).



연성의 경우 온도에 따라 급격히 변할 수 있다.  
Ductile to Brittle transition temperature

See Fig. 8.14

Article about Titanic

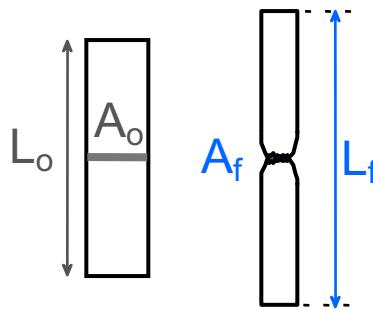
<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9801/Felkins-9801.html>

# How to quantify ductility?

- 연성은 길이 신장률 (percent elongation)을 사용하여 정량적으로 표현 가능.
- 또한 시편의 단면적 감소율을 이용해 정량적으로 표현 가능.

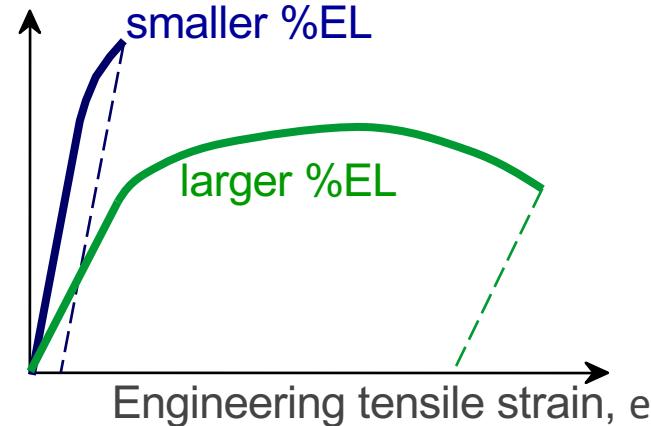
$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$



Engineering  
tensile  
stress,  $\sigma$

Adapted from Fig. 8.13,  
Callister & Rethwisch 9e.



대부분의 구조물들은 탄성 구간내에서 하중을 견디도록 설계.  
하지만 제품에 따라 구조물의 파괴가 일어날 때까지 소성변형의 정도가 중요한 지표가 되기도 한다.

# Why ductility is important?

---

## ■ Formability

Raw products such as steel sheets are shaped into various parts/components.

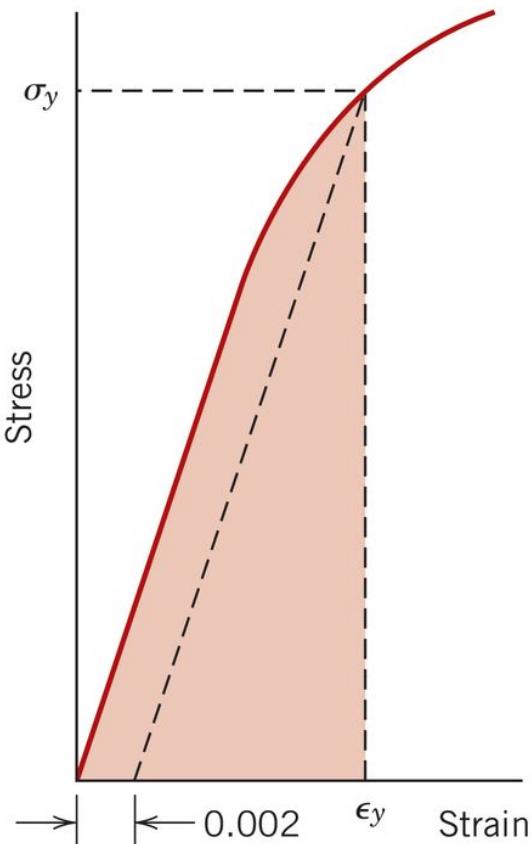
The material should not fail during this shaping procedure (forming procedure).

High ductility observed in uniaxial tension test is an indication of good formability.



# 탄력 (resilience)

- 탄성변형에 따른 에너지 흡수력/하중 제거에 따른 에너지의 회복력을 의미
- 탄력계수는 (modulus of resilience) 하중을 제거한 상태에서 항복점 (yield point)까지 응력을 상승시키는데 요구되는 단위 체적당 변형률 에너지로 나타냄



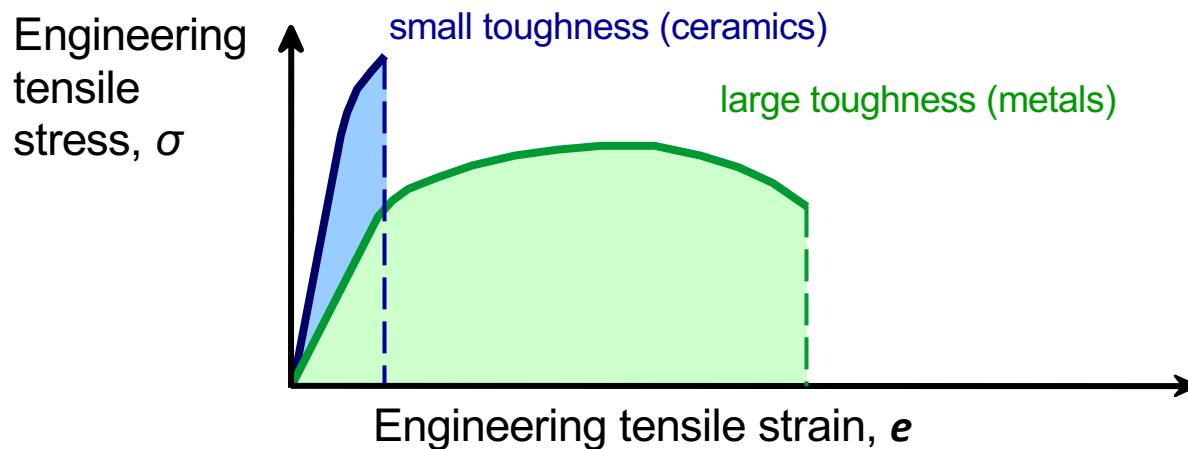
1. 응력( $\sigma$ )과 변형률( $\varepsilon$ ) 사이에 특정한 관계가 있음에 유의.
2. 따라서 응력은 변형률에 대한 함수로 나타낼 수 있다.  
따라서  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$
3. 이때  $\sigma$ 와  $\varepsilon$ 가 각각 y축 x축의 그래프로 표현한다면 그 그래프의 적분값 (면적)이 재료에 하중을 주어 한 일 (에너지)가 된다.
4. 위에 정의 된대로, 하중이 없는 상태에서 항복점까지 응력을 상승시키는데 요구되는 (단위 체적당) 변형률 에너지  $U_r = \int_0^{\varepsilon_Y} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$
5. 만약 항복점까지 응력과 탄성 변형률이 '선형'성을 가진다면

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_Y} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_Y} \mathbb{E}\varepsilon d\varepsilon = \mathbb{E} \int_0^{\varepsilon_Y} \varepsilon d\varepsilon = \frac{1}{2} \mathbb{E}\varepsilon_Y^2 = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y$$

# 인성 (toughness)

## 인성에 대한 두 가지 정의

- 인성은 균열이 '이미' 존재하는 재료의 '파괴'에 대한 저항 정도 (차후 10장에서 더 다룰 내용)
- 인성은 재료가 파괴될 때까지 일어나는 '소성변형'을 통한 재료의 에너지 흡수 정도.



Brittle fracture:  
Ductile fracture:

elastic energy  
elastic + plastic energy



- 1) 미리 균열을 가한 뒤 견디는 정도를 측정하거나
- 2) 혹은 겉으로 균열이 없는 것처럼 보이는 재료를 파괴가 일어날 때까지 소성변형시켜 파괴에 이르게 하여 측정

# Recap: engineering stress/strain

---

- 기계적 성질을 얻기 위한 실험으로 물리량을 취득할 때 시편의 크기에 무관한 물리량으로 바꾸는 것이 필요하다.
  - 시편의 하중/그리고 모양 변화에 있어서 기하학적 요소를 \*줄이는 가장 간편한 방법으로 engineering stress (공칭 응력)과 engineering strain (공칭 변형률)을 사용할 수 있다.
  - 차후에 배울 진응력과 공칭 응력은 기하학적 요소를 완전히 \*제거
- 다양한 응력과 변형률 상태
  - 압축, 인장 그리고 전단
  - 이 세가지 구성요소로 모든 응력 변형률 상태를 표현할 수 있다.
- 일축 인장 실험을 통해 응력과 변형률간의 '관계'를 커브의 형태로 얻을 수 있다.
  - 탄성과 소성
- 일축 인장 실험 데이터를 통해서 다양한 기계적 물성 파라미터를 얻을 수 있다.
  - 탄성 계수 (elastic modulus)
  - Poisson ratio
  - 항복 강도 (Yield strength)
  - 인장 강도 (Tensile strength)
  - 연성 (ductility)
  - 탄력 (resilience)
  - 인성 (toughness)