

Chapter1

# Mechanical Properties

강의명: 기계재료공학 (MFA9009)

---

정영웅

창원대학교 신소재공학부

[YJEONG@CHANGWON.AC.KR](mailto:YJEONG@CHANGWON.AC.KR)

연구실: #52-208    전화: 055-213-3694

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

# 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
  - 수직 (압축,인장) 그리고 전단
  - 위 두가지 구성 응력 (변형률) 요소로 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)

# Objectives

---

- 진응력과 진변형률
- 진응력과 공칭 응력관의 관계
- 진변형률과 공칭 변형률과의 관계
- Necking
- 경도(hardness) – 모스 굳기계 (Moh's scale of mineral hardness) – 활석방향인정..

# 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.

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

$F$ : 시편에 가해진 하중 (힘, 주로 N)

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

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

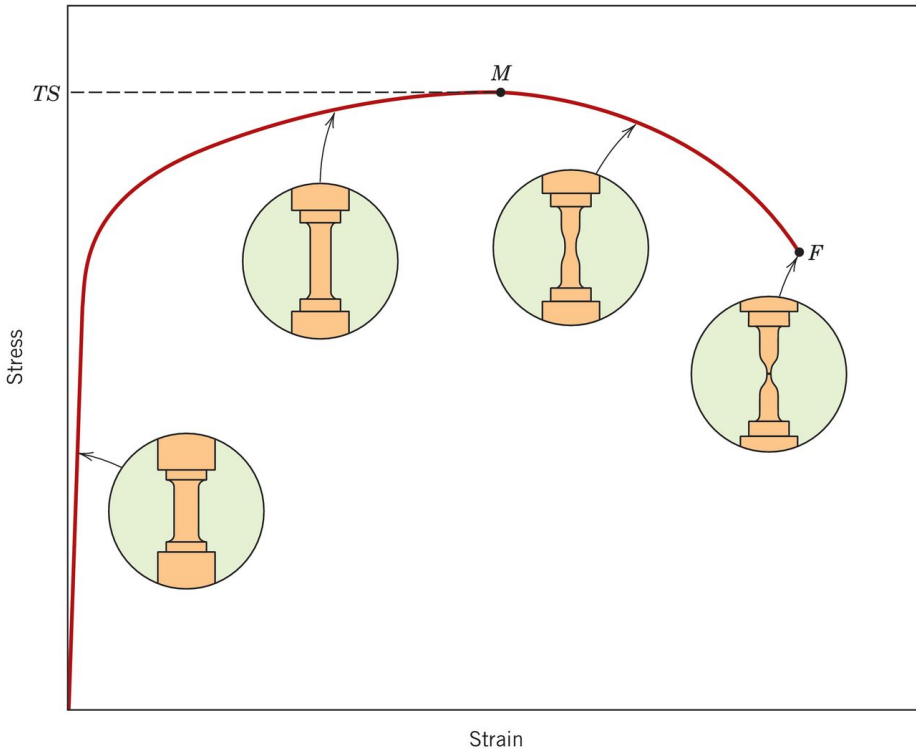
$l_0$ : 시편에 하중이 가해지기 전의 길이

$l_i$ : 순간순간 변한 길이

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

- \* 공칭 응력과 공칭 변형률은 시편의 기하학적 요소를 완벽히 '제거'하지 못하고, 일정부분 줄이는 효과가 있다.

# Necking



공칭 응력 / 공칭 변형률 곡선에서 보면 재료의 강도가 낮아지는 것처럼 보인다. 하지만 실제로는 변형이 집중되는 부분의 단면적이 감소함으로써 시편에 걸린 하중이 전체적으로 감소한다. 실제로 재료의 '강도'는 소성변형으로 인해 증가한다 (세기, 크기 물리량 비교...)

위와 같이 공칭 응력에서는 시편의 단면적 감소를 고려하지 못하는 단점이 있다.

따라서, 시편의 단면적 감소를 고려한 응력의 정의가 필요하다.

# 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)

A: 하중이 가해지는 시점에서의 시편 단면적 (주로  $\text{m}^2$  단위)

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

l: 시편에 하중가해지는 시점에서의 길이

dl: 순간순간 변한 길이 변화량 (infinitesimal)

dε: 순간순간 변한 변형률량 (infinitesimal)

- 위 진변형률은 순간순간 변형률의 '변화량' 모양(길이) 변화동안 모두 더하면(적분) 모양변화 후 (혹은 하중이 걸린 후)의 변화량을 얻을 수 있다.

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

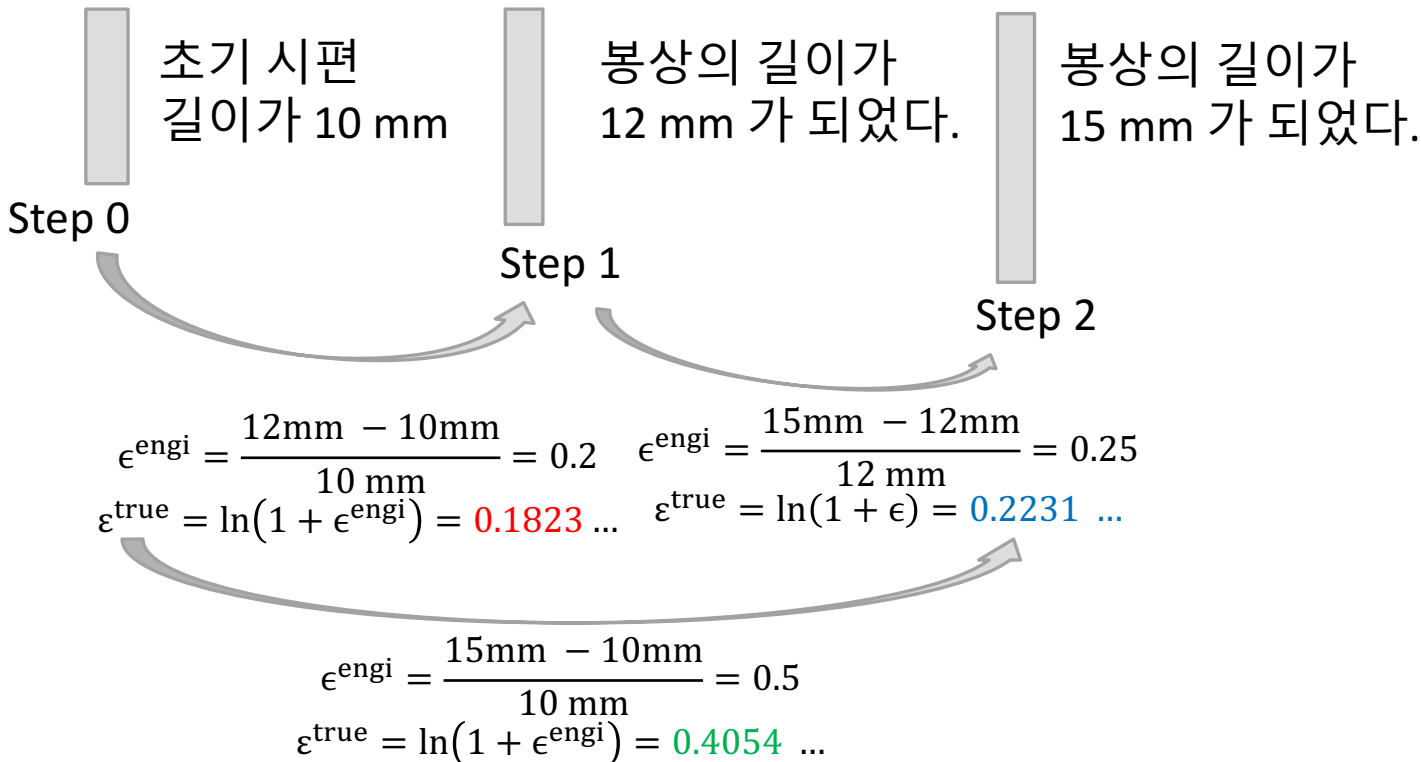
Eq. 8.16

# 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:  $\epsilon^{\text{engi}} = \frac{\Delta l}{l_0}$

진변형률:  $\epsilon^{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon^{\text{engi}})$



## 고찰

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

# 진응력과 공칭 응력의 관계

- 앞서 아래의 정의를 배웠다.

- $\sigma^{\text{engi}} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$

- $\sigma^{\text{true}} = \frac{F}{A} \quad (2)$

- 금속 재료의 경우, 소성 변형에 의한 부피가 매우 적다. 이는

- $A_0 l_0 = A_1 l_1 \quad (3)$

- 의 관계로 이어진다. 이를 다시

정리하면

- $\frac{A_0}{A_1} = \frac{l_1}{l_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \quad (4)$

- (1)과 (2)에서

- $\frac{\sigma^{\text{true}}}{\sigma^{\text{engi}}} = \frac{A_0}{A_1} = 1 + \epsilon^{\text{engi}}$

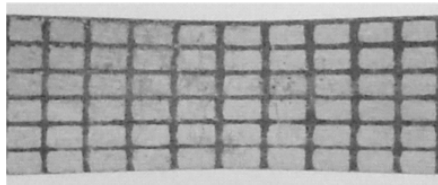
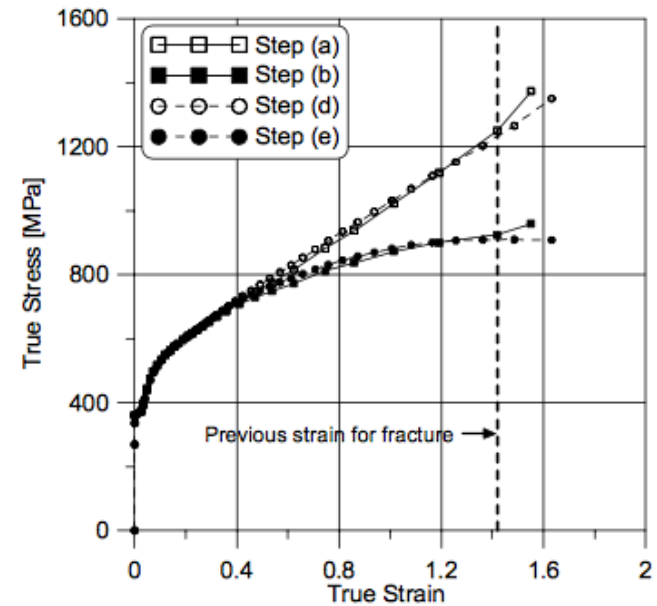
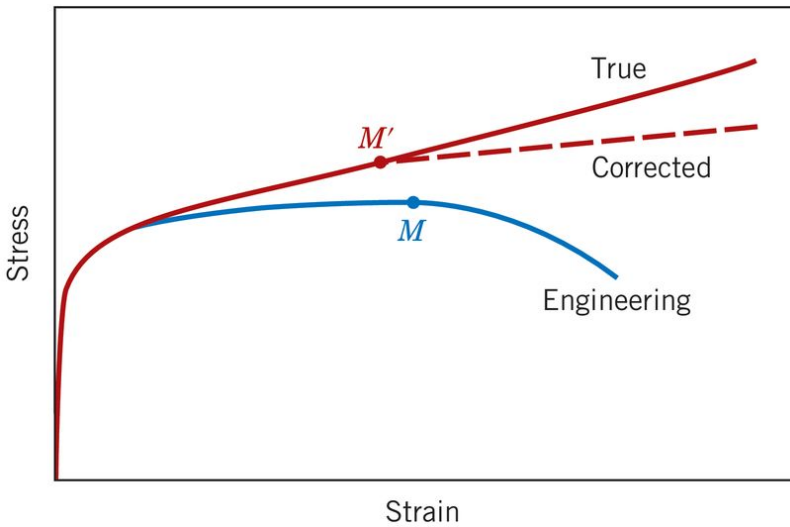
- 따라서

- $\sigma^{\text{true}} = \sigma^{\text{engi}}(1 + \epsilon^{\text{engi}})$

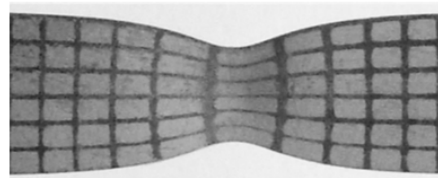
위의 관계식은 시편의 변형이 '균일' 할때만 가능 -> extensometer의 strain 측정법에 대해 잘 생각해보자. 변형이 '균일' 할 때만, 해당 시그널을 대표성이 있는 변형률로 변형이 가능하다.



# 변형률 곡선의 비교

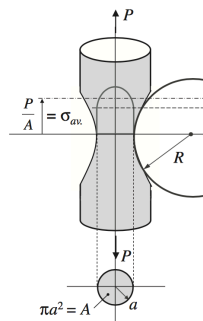


(a)  $\epsilon^p = 0.41$



(b)  $\epsilon^p = 1.42$  (close to fracture)

Bridgmann method



# 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.

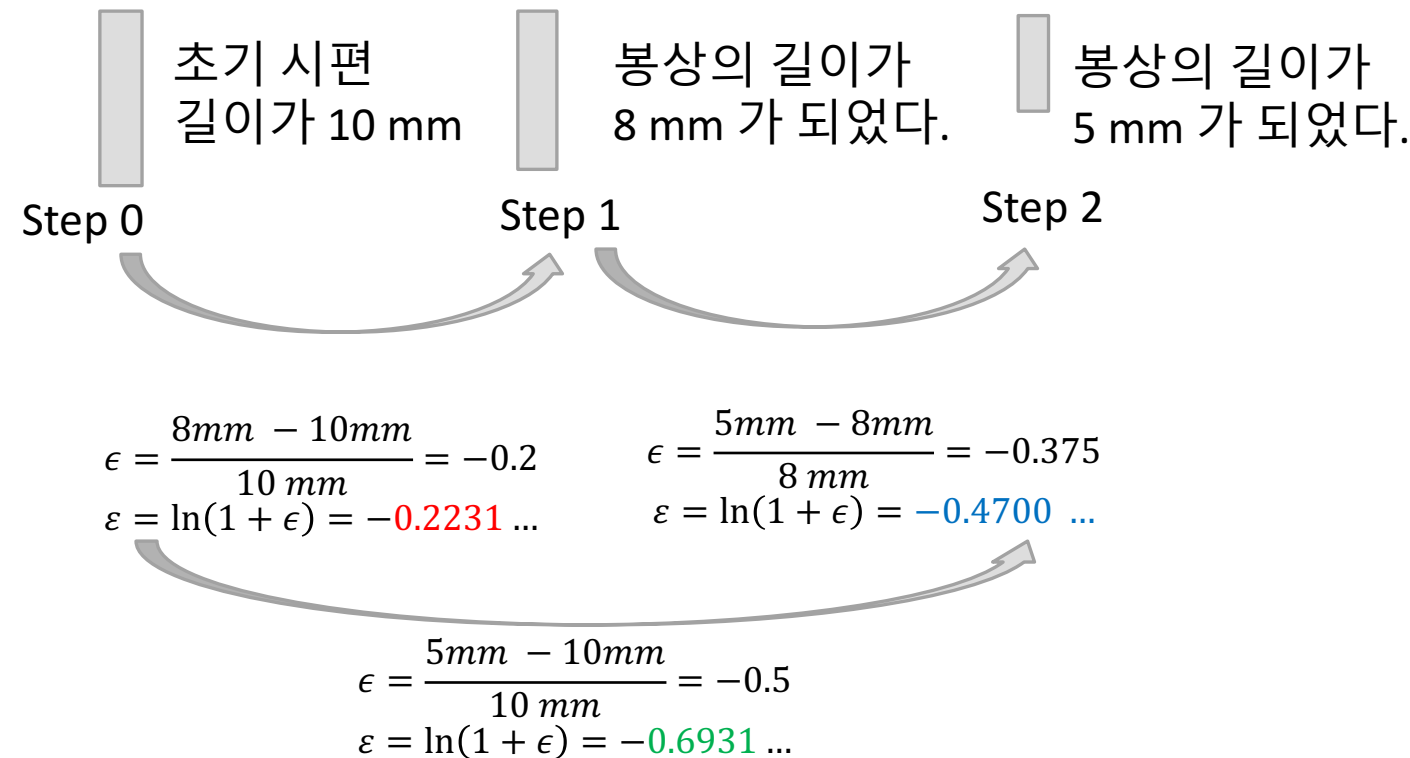
# 진변형률과 공칭 변형률 비교 (압축)

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

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

$\epsilon$ : 공칭변형률

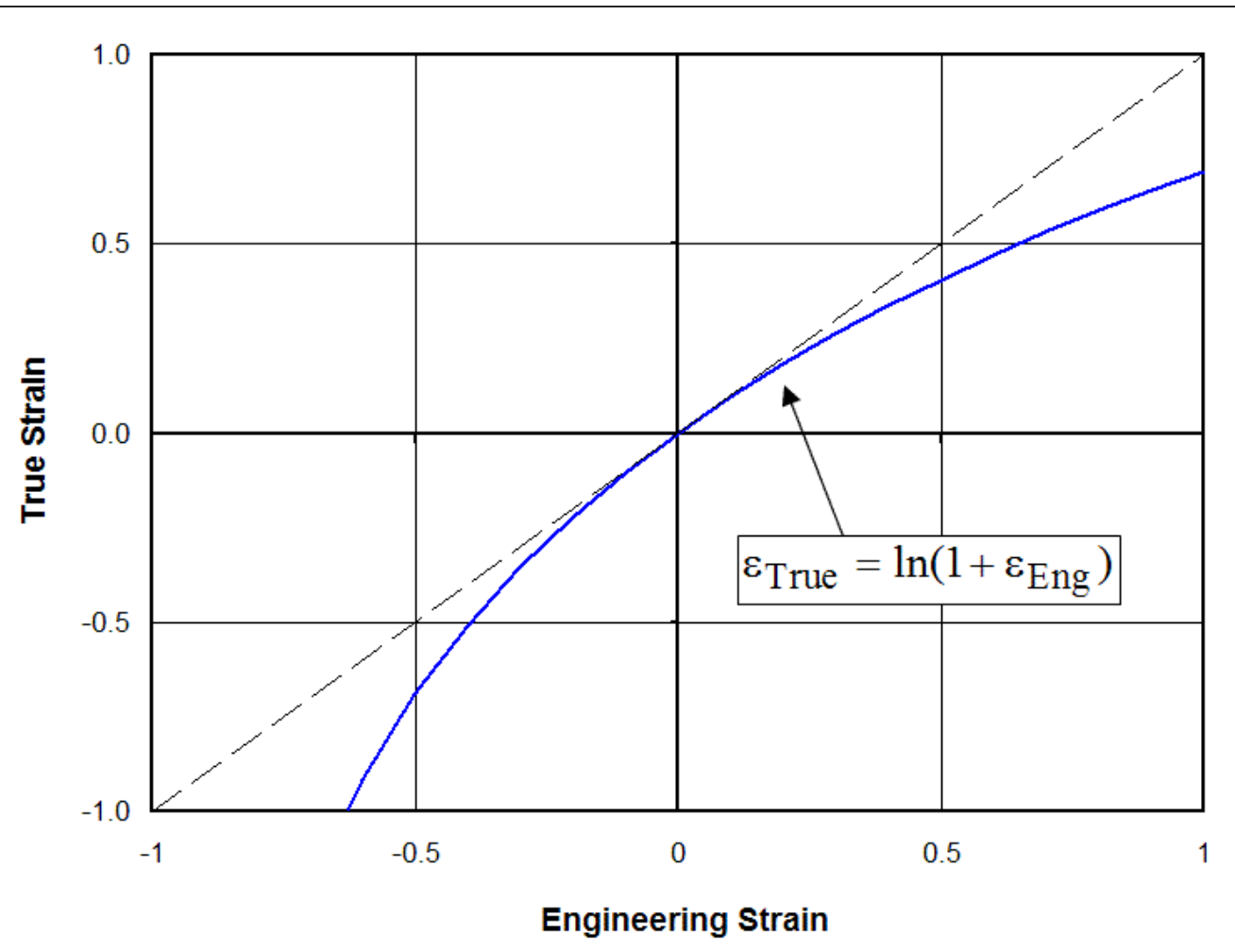
$\varepsilon$ : 진변형률



고찰

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

# Compare engineering strain/true strain



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

# Example (Solve it yourself)

---



초기 시편  
길이가 10 mm

Step 0

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

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

# 진응력/진변형률 Model

---

- 대부분의 금속 재료의 진응력과 진변형률에서 쉽게 발견할 수 있는 물질의 특성중에 하나가, 가공경화 (work-hardening / strain-hardening)이다.
- 그러한 금속의 진응력과 진변형률 곡선을 단순한 수학적 방정식으로 나타내면 편리하다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (\text{Hollomon equation})$$

예제 8.4, 8.5 한번 살펴만 보기

# 소성 변형 중의 탄성 회복

- 일축 인장 실험 도중에 하중을 제거하면, 전체 변형량에 포함이 된 '탄성' 변형은 '회복'이 된다. 따라서

$$\varepsilon^{\text{total}} = \varepsilon^{\text{elastic}} + \varepsilon^{\text{plastic}}$$

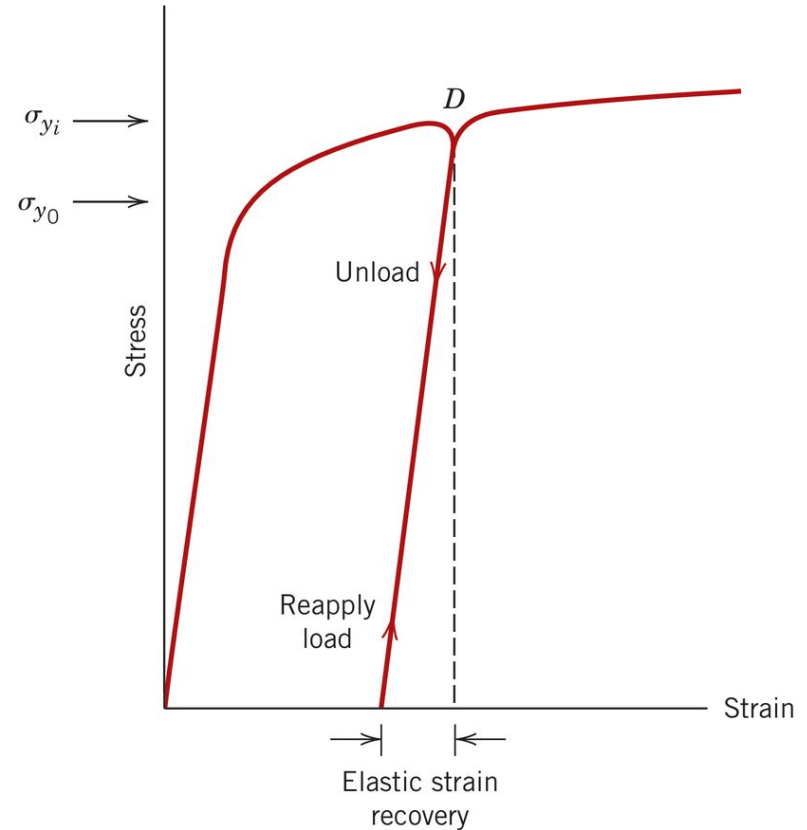
Elastic portion 은 하중이 제거되면, 회복(즉 zero)된다.

$$\varepsilon^{\text{total}} = \varepsilon^{\text{elastic}} + \varepsilon^{\text{plastic}} = \mathbb{E}^{-1}\sigma + \varepsilon^{\text{plastic}}$$

Plastic strain은 elastic strain에 비해 더 복잡한 방식으로 응력과 관계가 있다...

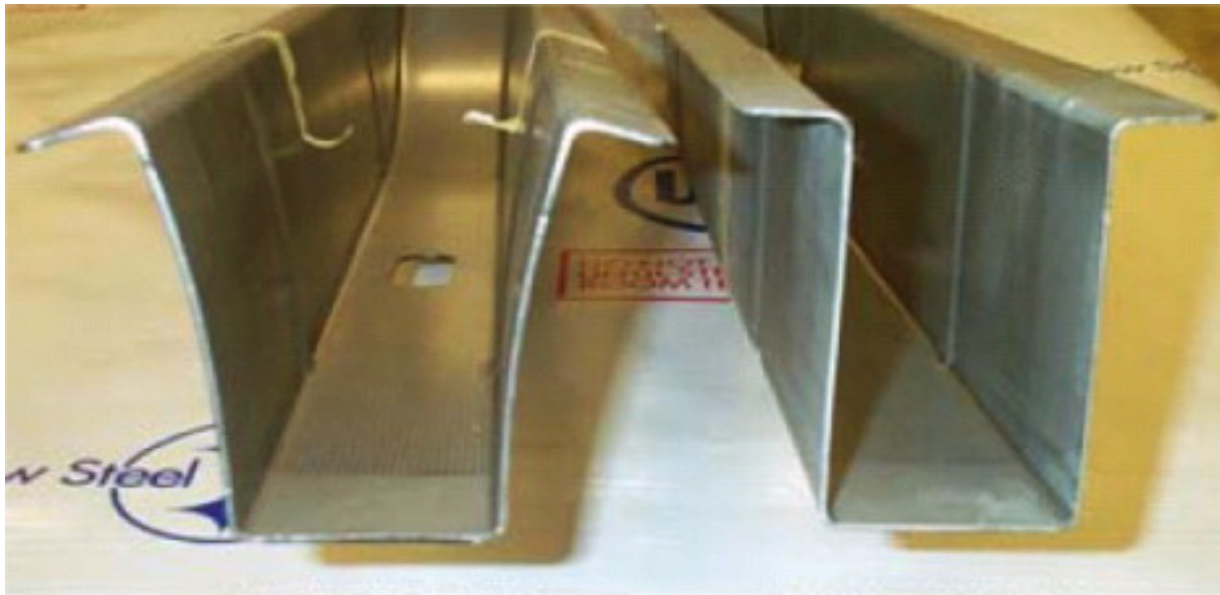
하중이 제거된 상태에서 다시 reload하면 앞서보다 '높은' 항복 강도를 보인다.

$$\sigma_{y0} \rightarrow \sigma_{yi}$$



# 소성 변형 중의 탄성 회복 (Springback)

친환경 자동차 개발 요구 -> 연비 개선 요구 -> 차체 경량화 요구  
-> 고강도 금속, 혹은 낮은 탄성 계수 금속의 사용 -> springback 증가



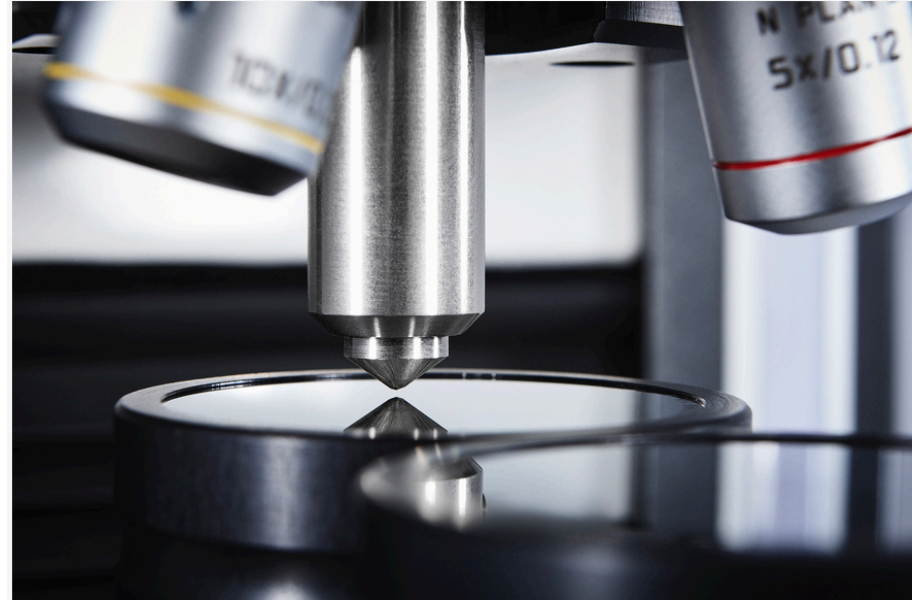
**DP 350/600**

**HSLA 350/450**

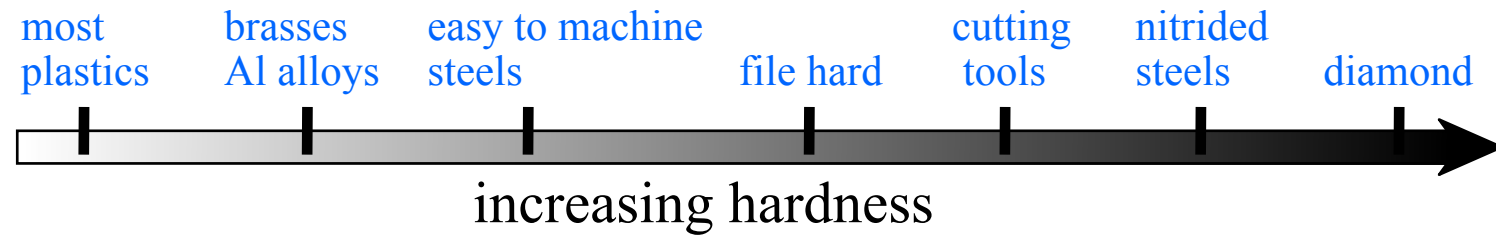
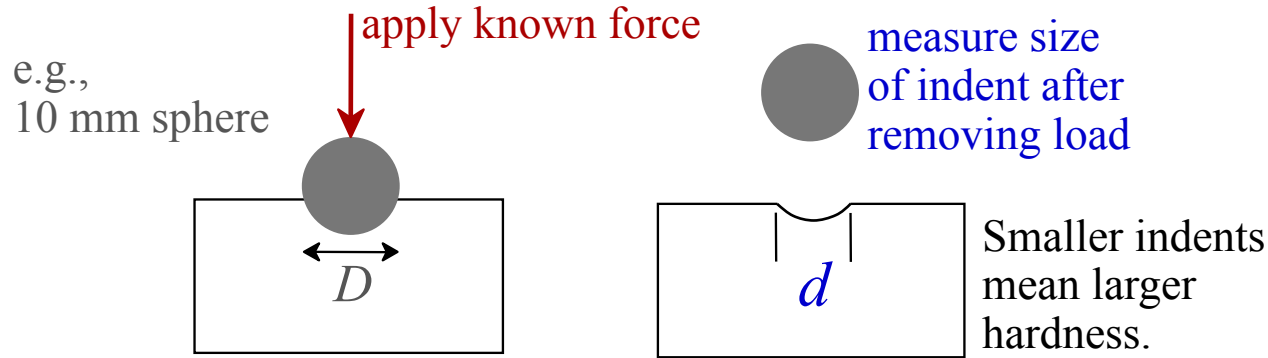


# 경도 (hardness)

- 모스 굳기계 (상대적인 스케일. 정량화되지 않았다).
- 우리가 원하는 굳기계는, 해당 굳기계에 따른 값이 두배 일때, 물리적으로도 두배 강하다는 의미를 나타낼 수 있는 system.
- 하지만 경도의 경우, 그런 system을 만들기가 쉽지 않다...
- 정량적인 경도 시험법은 누름자로 대상 재료의 표면을 누르는 방법으로 개발되었다.
  - 눌린 자국의 깊이
  - 눌린 자국의 크기
  - 위 둘을 경한 정도 (경도 지수)에 관련 시킨다.
- 경도 시험의 장점
  - 간단, 저렴
  - 비파괴적 - \*과도한\* 시편의 변형이 발생하지 않는다. 매우 국부적인 변형.
  - 기타 다른 기계적 성질과 관련성이 보고되어 왔다. (어느 정도 유추 가능 - 추후에 더 자세히)



# 경도 시험법



누름자 (indenter)의 모양, 크기, 그리고 하중의 세기등에 따라 다양한 시험법이 있다.

# Rockwell and Brinell (macrohardness)

## Rockwell

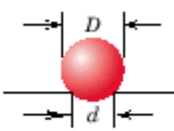
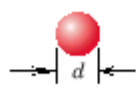
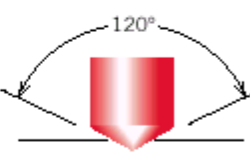



- 누름자의 종류는 ball 타입, 그리고 원추형 다이아몬드 (Brale) 가 있다.
- 실험법:
  - 초기 미세 하중 (minor load)
  - 이어서 주 하중 (major load)
  - 두 하중사이에 생긴 침투 깊이 (depth) 차이로 경도지수를 결정한다. (HR 지수)
- 종류
  - 로크웰, 가상 (superficial) 로크웰

- 어떤 누름자?
  - 얼마만큼의 하중?
- 위 두 정보를 스케일 상징으로 표기한다 – see Tables 8.6a and 8.6b

## Brinell

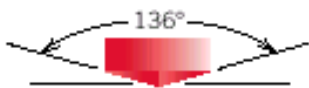

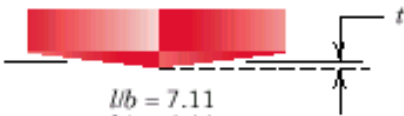
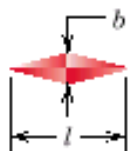
- Rockwell과 마찬가지로, ‘구형(spherical)’ 누름자로 누른다. (HB 지수)

**Table 6.4** Hardness Testing Techniques

| Test                              | Indenter  | Shape of Indentation   |  | Load   | Formula for Hardness Number <sup>a</sup>       |
|-----------------------------------|---|--|--|--|--|
|                                   |   | Side View  | Top View   |  |  |
| Brinell                           | 10-mm sphere of steel or tungsten carbide   |   |   | P  | $HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$ |
| Rockwell and Superficial Rockwell | {                     Diamond cone<br>$\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter<br>steel spheres                     } | <br> | <br> | 60 kg }<br>100 kg } Rockwell<br>150 kg }<br>15 kg }<br>30 kg } Superficial Rockwell<br>45 kg } |  |

# Knoop and Vickers (microhardness)

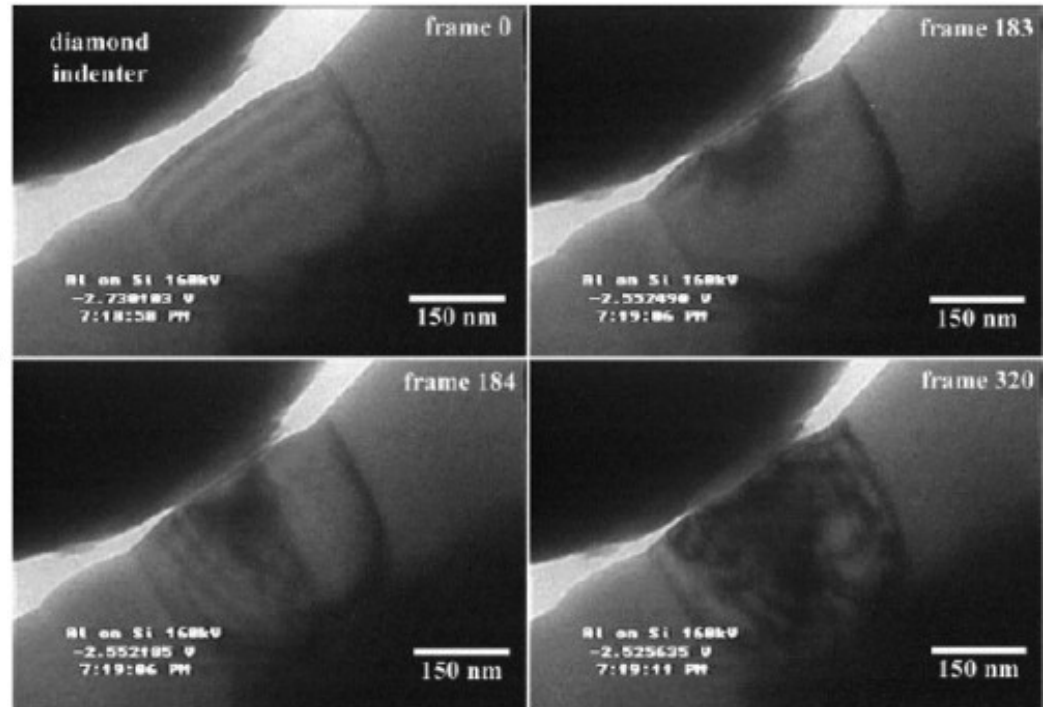
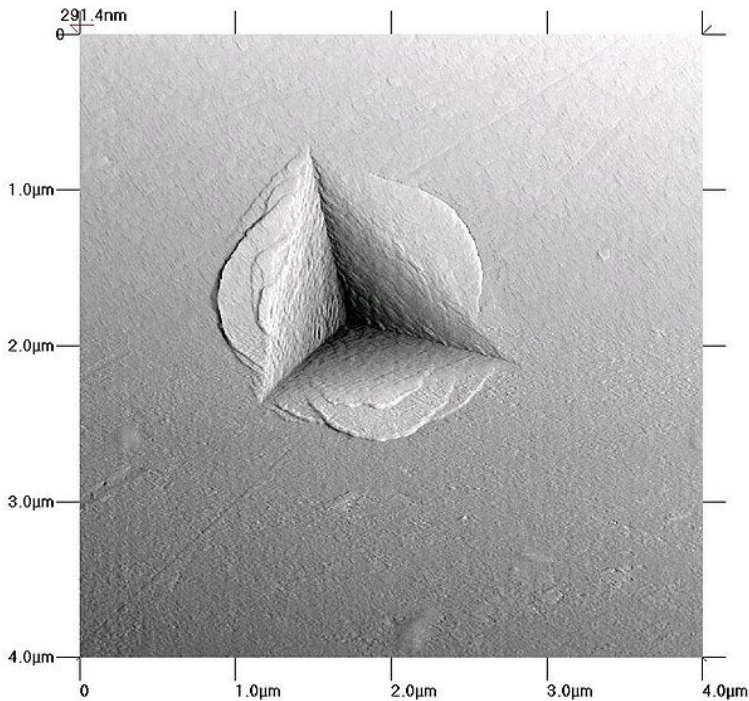
- Knoop (HK) and Vickers (HV) use diamond-shape indenters.
- 상대적으로 매우 작은 하중을 사용 (1~1000g) -> 현미경을 사용하여 누름자국을 관찰하여 경도 지수를 결정한다.

|                          |                    |   |  |     |                     |
|--------------------------|--------------------|---|--|-----|---------------------|
| Vickers<br>microhardness | Diamond<br>pyramid |                                    |   | $P$ | $HV = 1.854P/d_1^2$ |
| Knoop<br>microhardness   | Diamond<br>pyramid | <br>$l/b = 7.11$<br>$b/t = 4.00$ |  | $P$ | $HK = 14.2P/l^2$    |

# Nano indentation

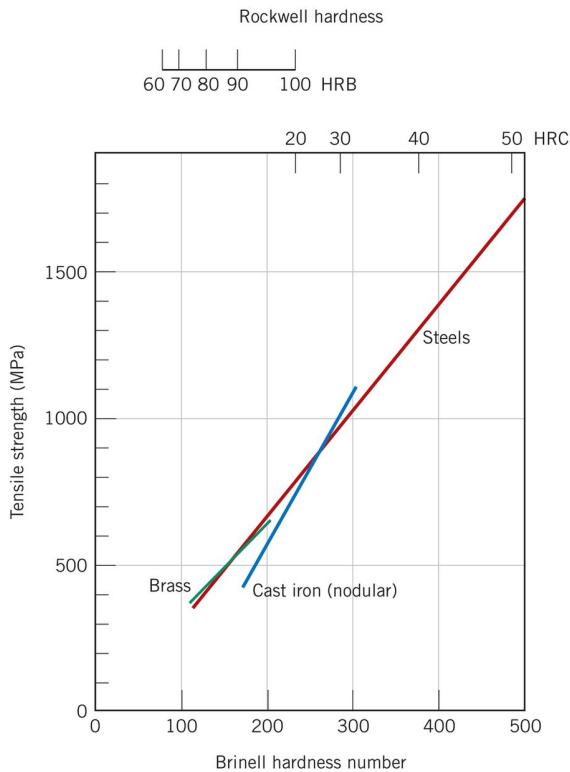
Can be applied to individual grains.

Method to study the strength of material in small scale



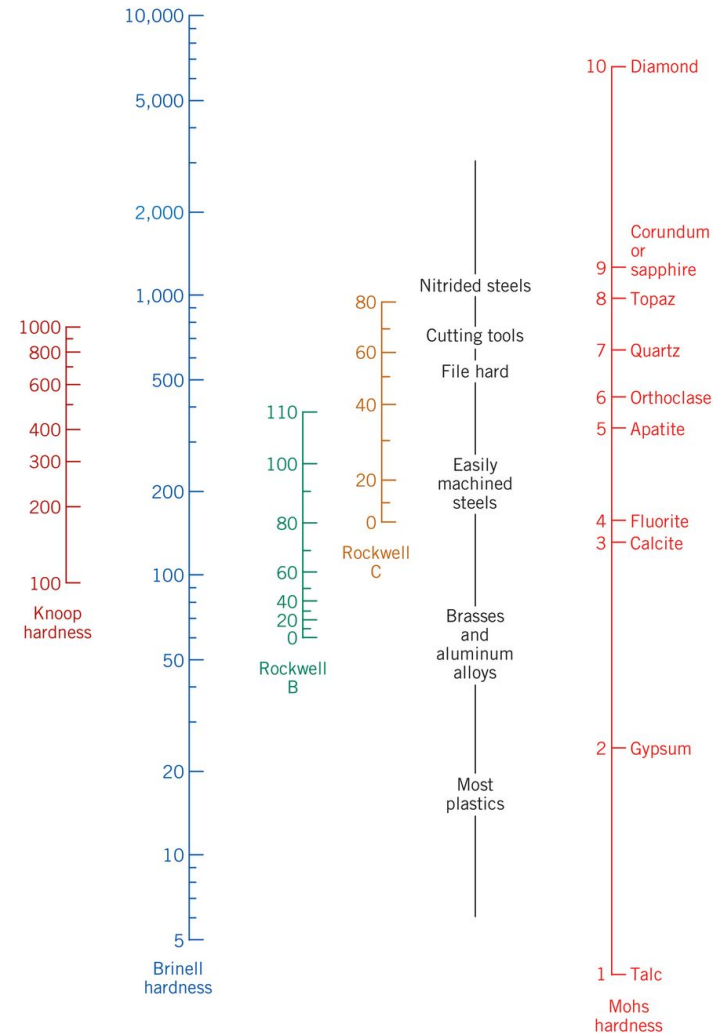
# 경도 변환

## 서로 다른 경도계간의 변환 – 경도 스케일의 비교 – 그림 8.18



Adapted from Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), 1978; and Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), 1979. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.

- 경도와 인장강도간의 상관관계
- 둘다 소성변형에 대한 저항성
  - 따라서 그 둘간 '비례적' 관계



Adapted from G. F. Kinney, Engineering Properties and Applications of Plastics, p. 202. Copyright © 1957 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

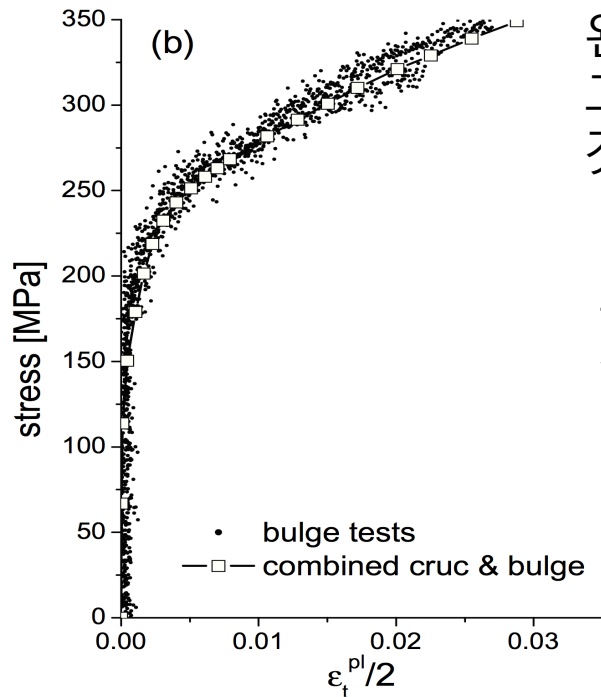
# Recap (Table 8.7)

**Table 8.7**  
Summary of  
Mechanical Properties  
for Metals

| <i>Property</i>       | <i>Symbol</i> | <i>Measure of</i>                           |
|-----------------------|---------------|---|
| Modulus of elasticity | $E$           | Stiffness—resistance to elastic deformation |
| Yield strength        | $\sigma_y$    | Resistance to plastic deformation           |
| Tensile strength      | $TS$          | Maximum load-bearing capacity               |
| Ductility             | %EL, %RA      | Degree of plastic deformation at fracture   |
| Modulus of resilience | $U_r$         | Energy absorption—elastic deformation       |
| Toughness (static)    | —             | Energy absorption—plastic deformation       |
| Hardness              | e.g., HB, HRC | Resistance to localized surface deformation |

# 측정된 재료 성질에서의 편차 그리고 불확도 (uncertainty)

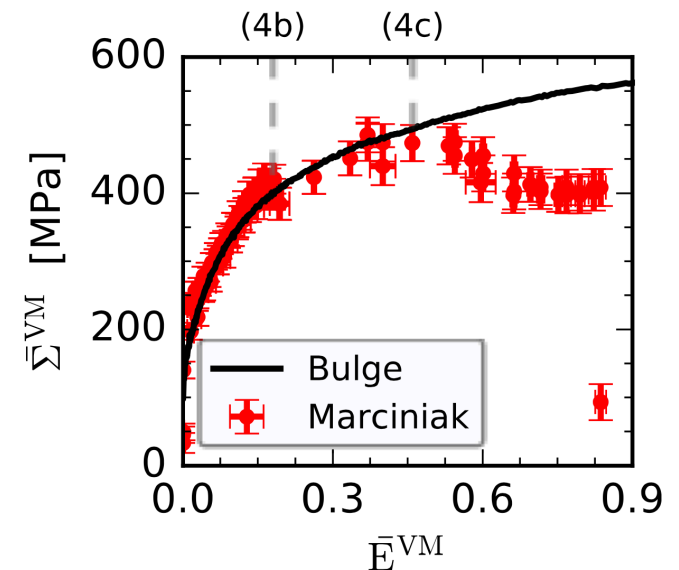
■ 공학에서 사용하는 재료들의 성질은 정확한 값이 아니다.



왼편의 그래프에서 Yield stress를 결정하는 방법을 고민해보자. 해당 실험치에서의 편차는 어디서 기인한 것일까?

오른편처럼, 같은 제품이라도 큰 편차를 가진 물성을 보여준다.

Steglich, Jeong, Omar, and Kuwabara (2011) IJSS



Jeong et al. (2016) Acta Materialia.



# 측정된 재료 성질에서의 편차 그리고 불확도 (uncertainty)

---

- 평균값 (mean value)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- 표준편차 (standard deviation)

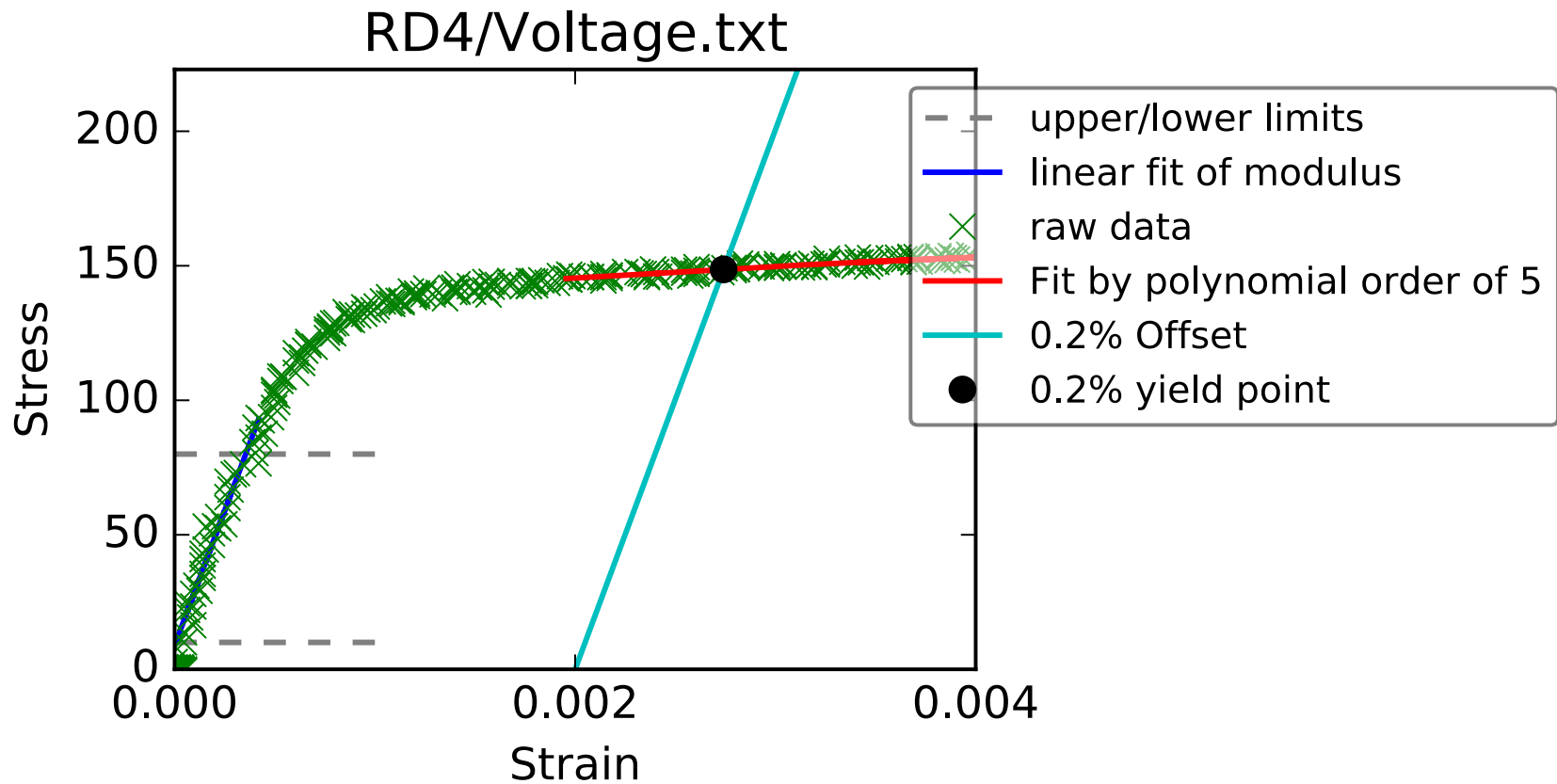
$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

---

예제 8.6 참고.

# More advanced material parameter (property) determination

- A case for uniaxial tension stress/strain data for interstitial-free steel.



# 설계/안전 계수

- 공학 구조물에 쓰이는 재료들의 기계적 성질에는 항상 '불확도'가 존재.
- 공학 구조물에 쓰이는 재료들이 구조설계상 특정 물성을 가져야 안전할 경우, 더 '보수적'으로 설정하는 것이 필요하다.
- 예기치 못한 파손을 방지하기 위해 '여유 있는' 설계를 하여야 한다.
- 한 방법으로 Design stress (설계 응력,  $\sigma_d$ )의 개념을 도입.
  - 실제 디자인상 예상되는 최대 하중 ( $\sigma_c$ ) 에 설계 계수( $N'$ )를 곱한 값 즉
$$\sigma_d = N' \sigma_c$$
- 혹은 안전 응력 (safe stress) 또는 사용 응력 (working stress,  $\sigma_w$ ) 개념 을 도입.
  - 사용 응력은 실제 항복 응력에 안전계수  $N$ 으로 나눈 값으로 정의
$$\sigma_w = \sigma_y / N$$
- 과도한  $N$ 값? 아마도 불필요한 비용 지불로 이어질 수도. 경제성 고려. 정부 규제.

# Recap

---

- 공칭응력, 공칭 변형률, 진응력, 진변형률
- Necking과 진응력, 공칭 응력 사이의 관계; 진변형률과 공칭 변형률 사이의 관계
- 소성변형과, 탄성 회복. 그리고 springback
- 경도 (다양한 경도 측정법. Macrohardness 그리고 microhardness)
- 재료의 기계적 물성치에서의 불확도. 그리고 설계/안전 계수 도입.