

Chapter 9. Failure of Materials

Fundamentals of Fracture

Fracture (파괴): 용융점보다 낮은 온도에서 물체가 나누어지는 현상

Ductile fracture (연성 파괴)

~ 소성 변형 진행 후 파괴, 흡수 에너지 큼
균열 천천히 진행, **stable crack**

Brittle fracture (취성 파괴)

~ 소성 변형 거의 없이 파괴, 흡수 에너지 작음
균열 매우 빠르게 전파, **unstable crack**, 위험

대략 금속: 주로 연성 파괴

세라믹: 주로 취성 파괴

고분자: 연성 및 취성 파괴 모두

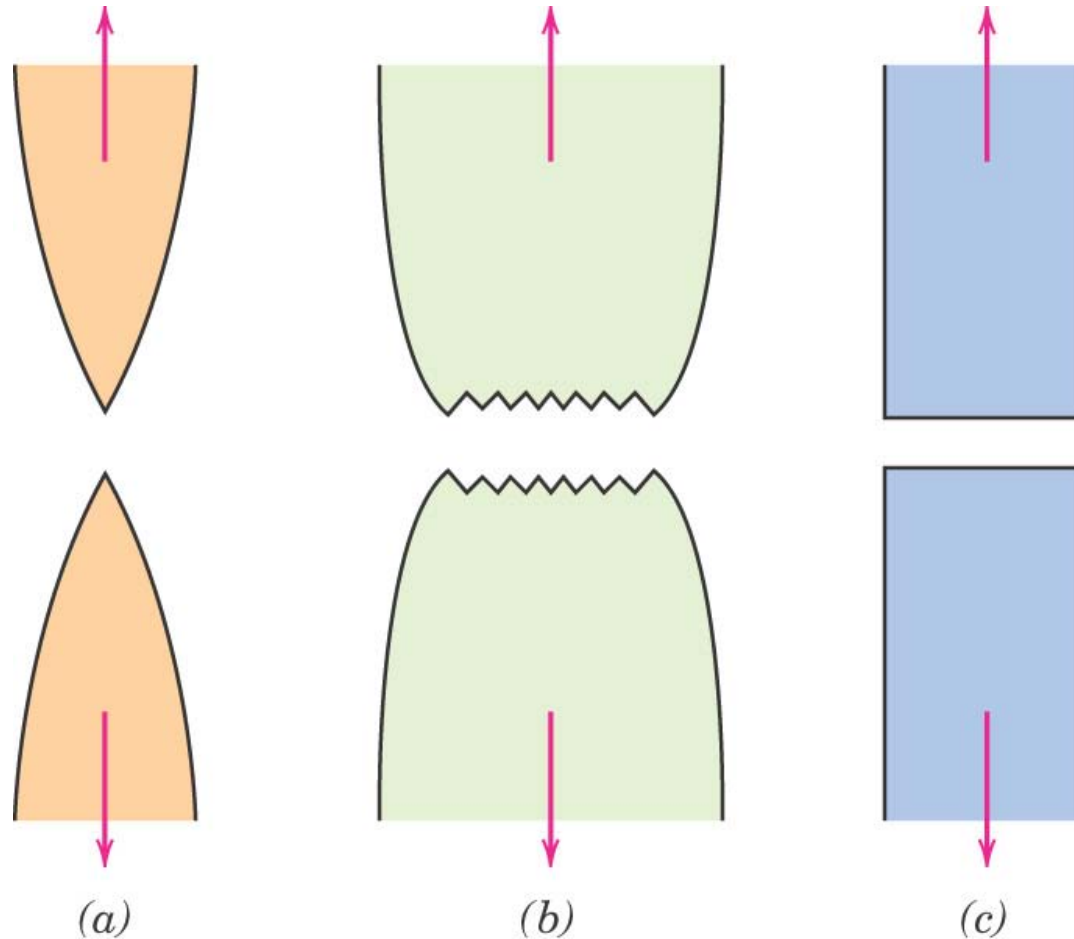


Fig. 9.1 (a) 매우 연한 재료의 연성 파괴, (b) 일반적인 연성 재료의 연성 파괴, (c) 소성 변형이 없는 취성 파괴.

Ductile Fracture

매우 연한 재료의 연성 파괴 (Fig. 9.1 (a))

- 순금 or 납과 같은 연성 금속의 상온 파괴시
일반 금속, 고분자 재료 or 유리의 고온 파괴시
끊어지는 부분이 점으로 되어 거의 100% 단면적 감소

일반적인 금속의 연성 파괴 (Fig. 9.1 (b) & Fig. 9.2)

- 파괴 전에 necking 현상 나타난 후 미세 cavity 형성
성장한 미세 cavity가 연결되어 crack 형성 및 전파
전단 응력이 최대인 45° 각도로 전단 파괴
(Cup-and-cone fracture: 한 쪽은 컵, 다른 쪽은 원뿔 형상)

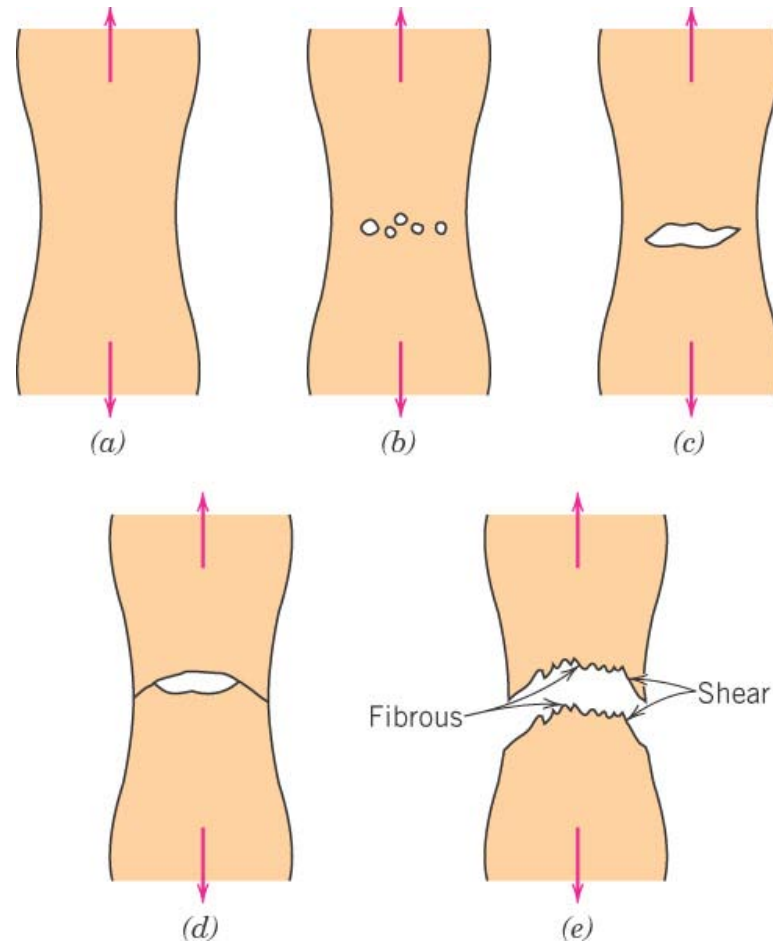


Fig. 9.2 Cup-and-cone fracture의 진행 단계: (a) 초기 necking, (b) 작은 cavity(균열) 형성, (c) 균열이 합쳐 crack 형성, (d) crack 전파, (e) 최종 전단 파괴 (인장 방향에 45° 방향).



Fig. 9.3 (a) 알루미늄의 cup-and-cone fracture, (b) Mild steel의 취성 파괴.

Brittle Fracture

- 균열의 진행 방향은 작용 인장 응력 방향에 거의 수직
(Fig. 9.1 (c))
소성 변형이 일어난 흔적이 거의 없음
V 자 모양의 균열 시작점에서 시작되어 연속적으로 퍼져 나감
대체적으로 표면이 평탄

Transgranular fracture (입내 파괴)

- 취성 파괴가 결정면을 따라 원자간 결합이 끊어지며 진행

Intergranular fracture (입계 파괴)

- 취성 파괴가 결정립의 경계를 따라 끊어지며 진행

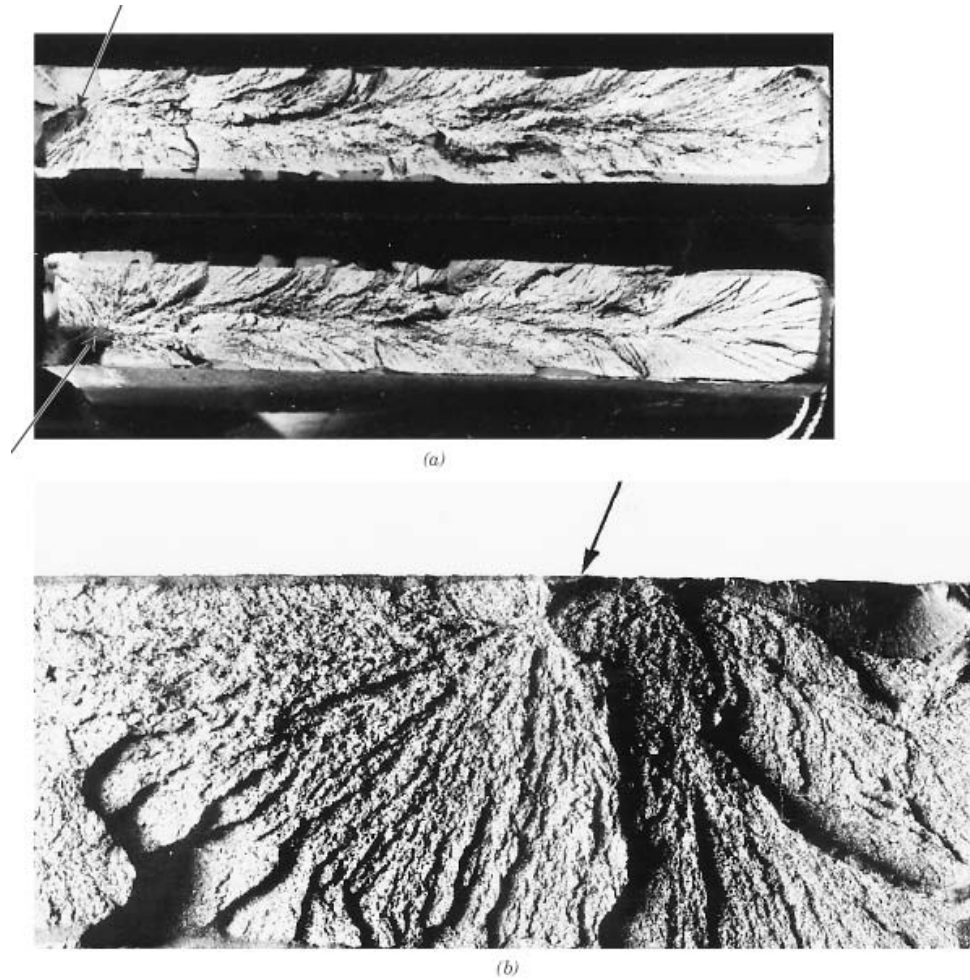


Fig. 9.5 (a) 취성 파괴 (화살표는 균열생성 위치),
(b) 방사선으로 퍼진 형태의 취성 파괴.

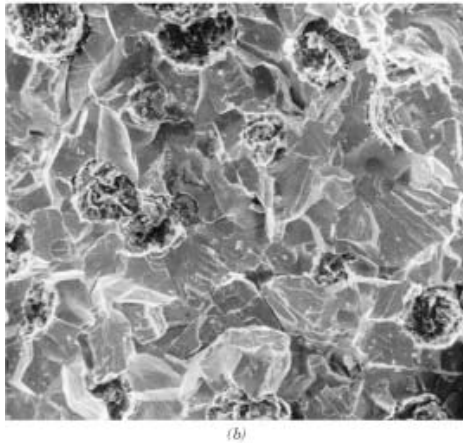
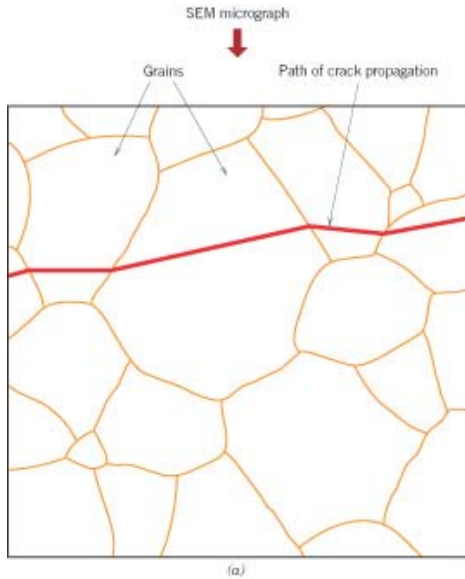


Fig. 9.6 입내 파괴.

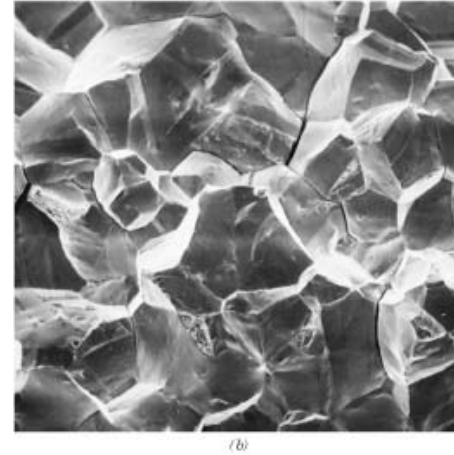
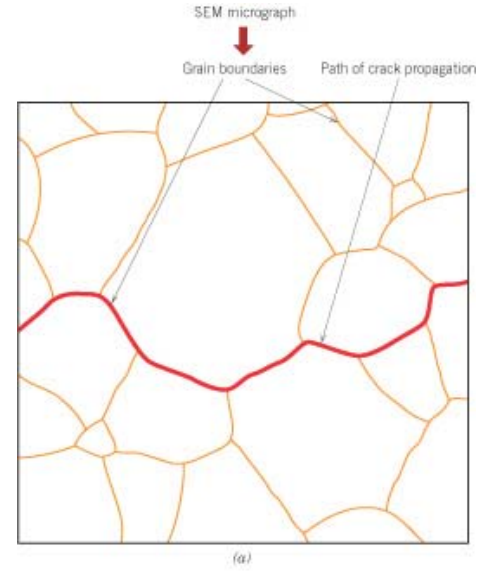


Fig. 9.7 입계 파괴.

Brittle Fracture of Ceramics (세라믹의 취성 파괴)

파괴 강도는 원자 결합 이론에서 예측한 값에 비해 매우 낮음.

← 재료 내의 결함(microcrack, internal pore, grain corner) 때문

세라믹의 경우 파괴 강인성보다 작은 경우에도 파괴 가능

→ static fatigue (정적 피로) or delayed fracture (지연 파괴)

압축 강도가 인장 강도보다 훨씬 큼

하중을 가하는 조건에 따라 생성되는 균열의 외형 (Fig. 9.13)

세라믹 재료의 파단면 미세조직 (Figs. 9.14 & 15)

→ mirror region, mist region, hackle region

파괴 응력 증가 → 균열 가속도 증가 →
 임계 속도에 빨리 도달 → 거울 반경 감소 } $\sigma_f \propto \frac{1}{r_m^{0.5}}$

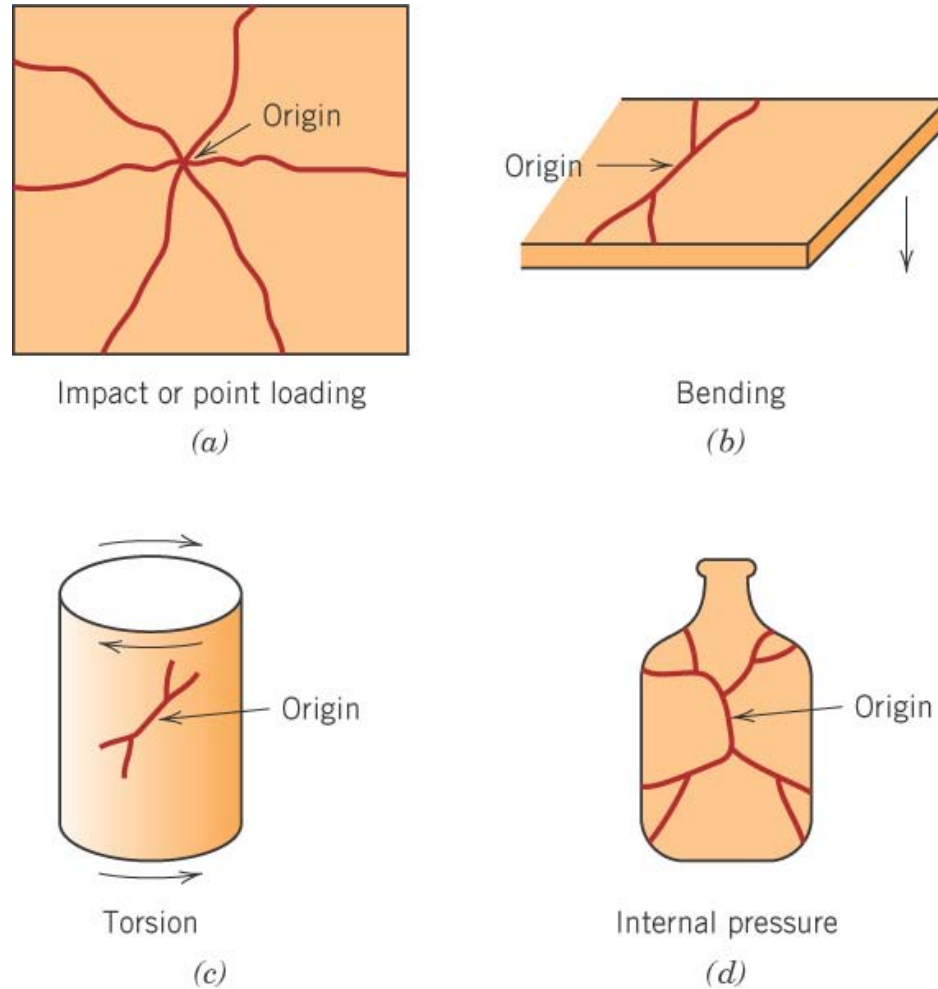


Fig. 9.13 취성 세라믹재료의 균열 양식 및 균열 시작점: (a) impact loading, (b) bending, (c) torsional loading, (d) internal pressure.

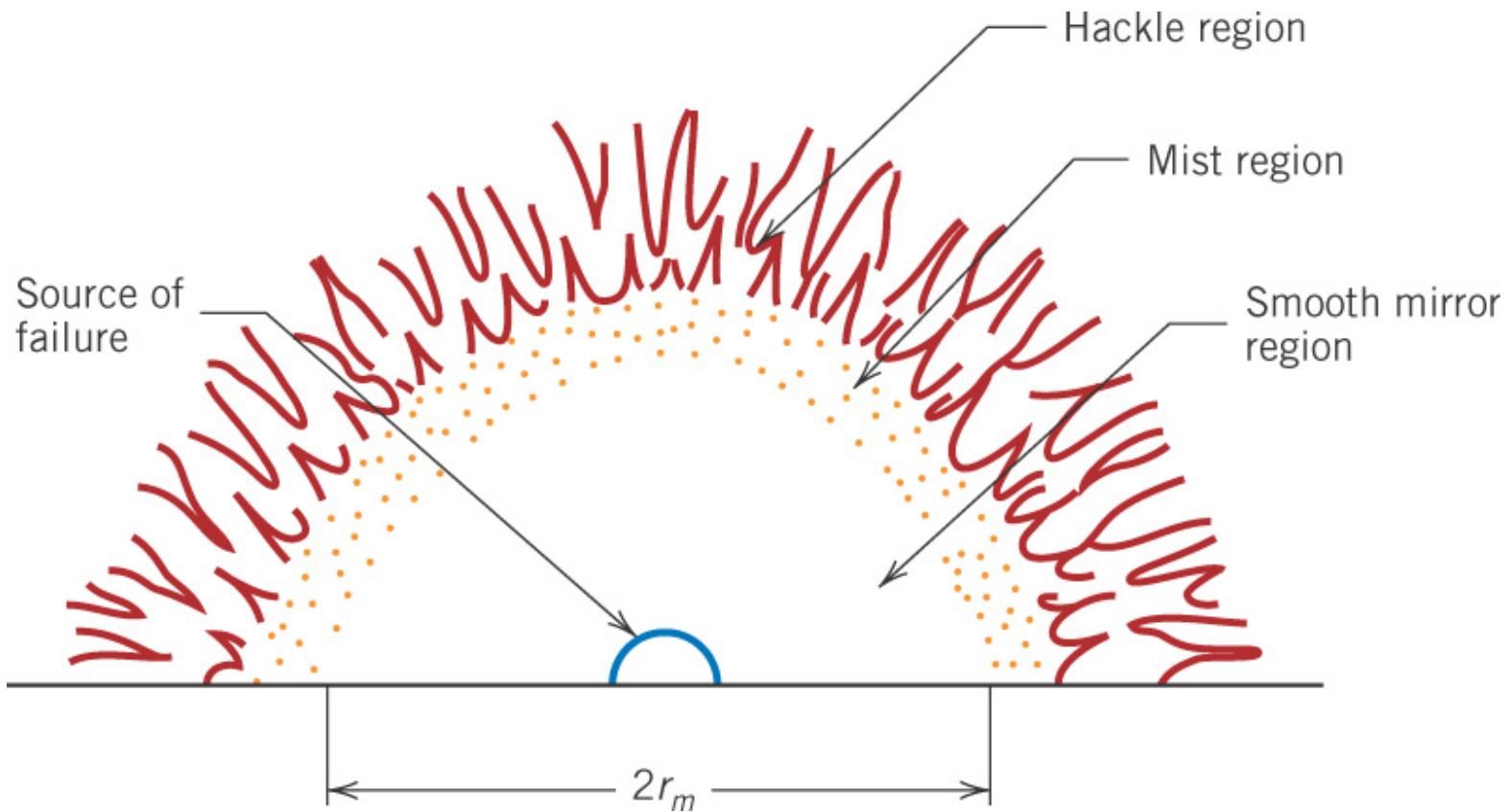


Fig. 9.14 취성 세라믹재료의 파단면에서 관찰되는 전형적인 특징.

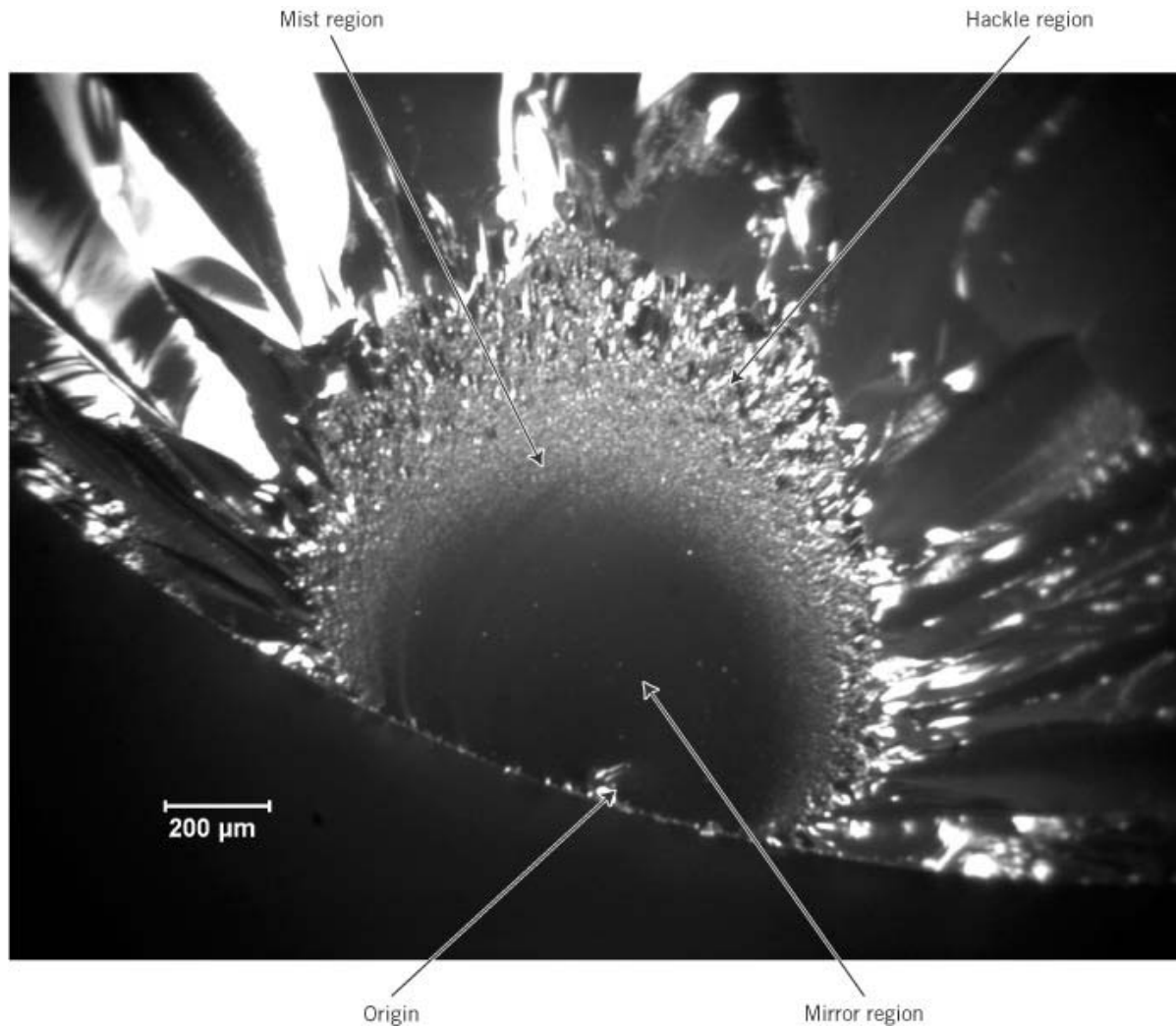


Fig. 9.15 Fused silica rod (용융 실리카 봉)의 파단면 사진: 파단 시작점, 거울 구역, 흐림 구역, 깃털 구역이 표시됨.

Fracture of Polymers (고분자 재료의 파괴)

열경화성 고분자 ~ 취성 파괴

열가소성 고분자 ~ 연성 파괴 or 취성 파괴

많은 경우 ductile-to-brittle transition (연성-취성 전이)가 일어남

취성 파괴를 일으키는 요인:

온도 감소, 변형 속도 증가, notch의 존재, 시료 두께의 증가,
고분자 재료 구조 변화 등

PMMA의 응력-변형률 그래프 (Fig. 7.24)

→ 온도가 증가하면서 취성 파괴에서 연성 파괴로 바뀜

Craze: 취성 고분자의 파단시 균열 끝부분에서의 미세 균열

→ microvoids와 fibrillar bridges로 구성

(Figs. 9.16 & 17)

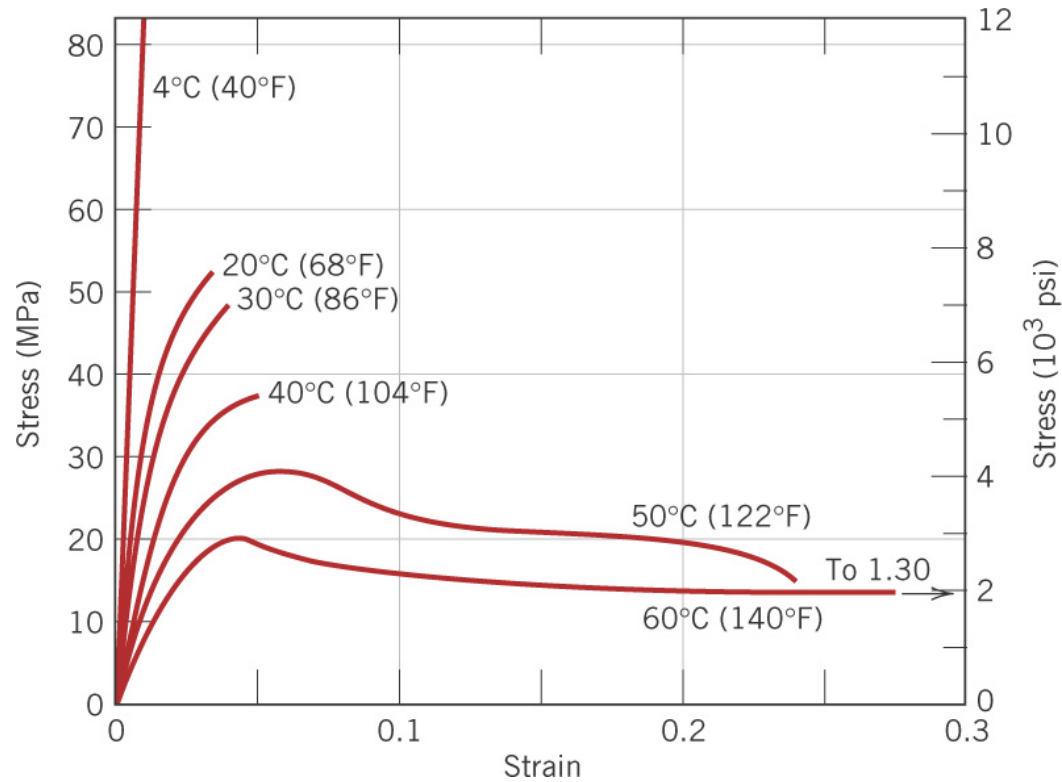


Fig. 7.24 PMMA의 응력-변형률 거동에 끼치는 온도의 영향.

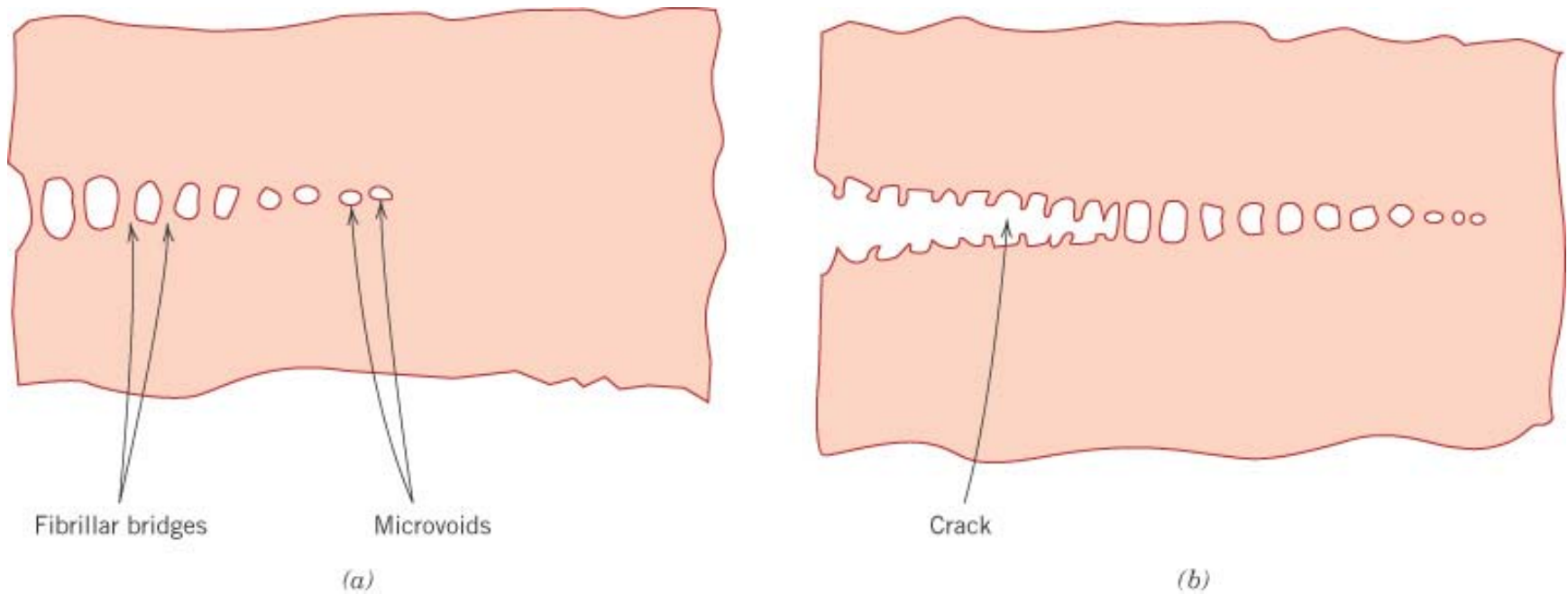


Fig. 9.16 (a) Microvoids와 fibrillar bridges로 구성된 craze,
(b) craze의 진행에 따른 crack (균열)의 생성.

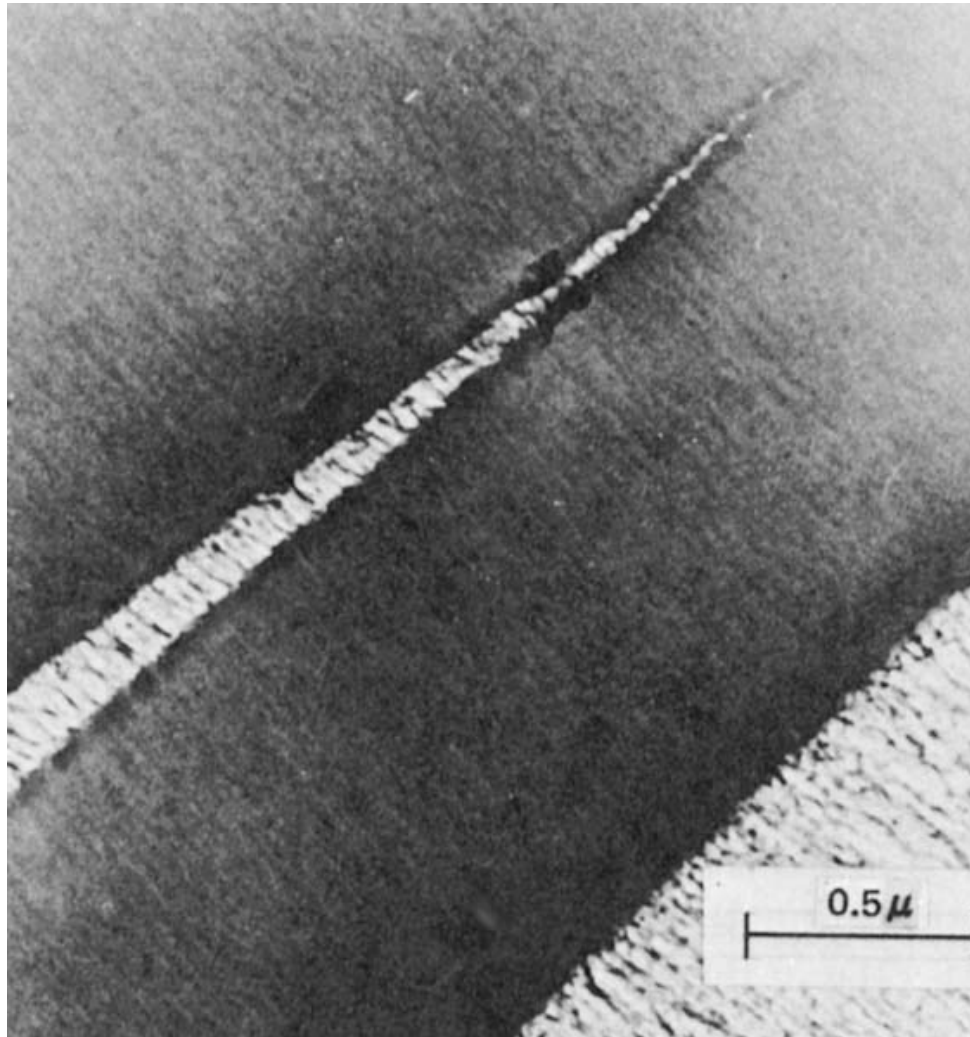


Fig. 9.17 PPO (폴리페닐렌 옥사이드)의 craze 사진.

Impact Fracture Testing (충격 파괴 시험)

~ 매우 심한 파괴 조건을 부과할 경우에 대한 재료의 파괴 거동 평가

Impact testing techniques (충격 시험법)

→ 해머의 진자 운동을 이용하여 시편 파괴시의 흡수 에너지 평가

2 가지 표준 충격 시험법 (Fig. 9.18)

{ Charpy tests (CVN: Charpy V-notch)
Izod tests

← 충격 시험 시편의 놓는 방향 및 위치에서 차이

충격 시험 값은 시험 시편간의 상대적인 파괴 성질을 나타냄
(정량적인 값으로는 사용 어려움)

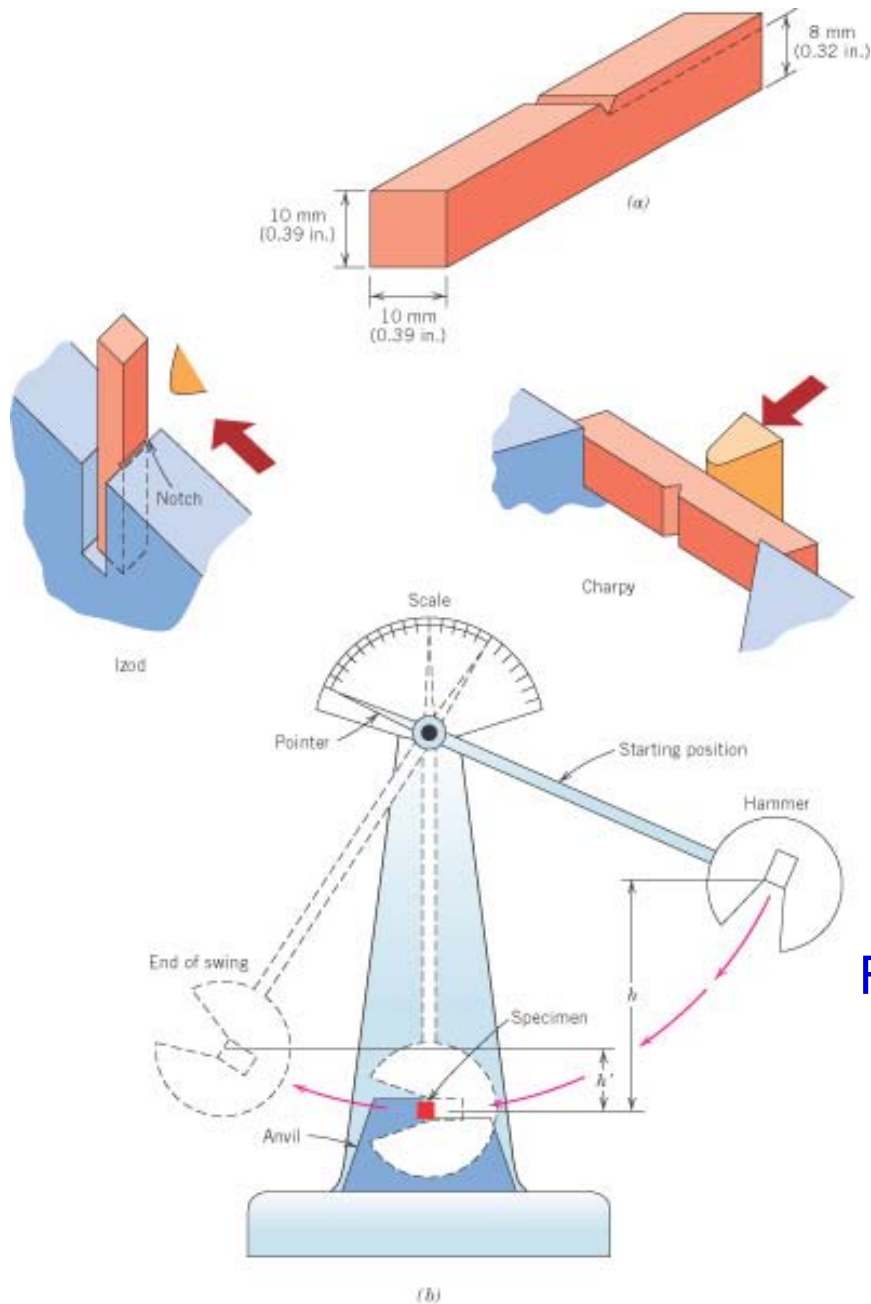


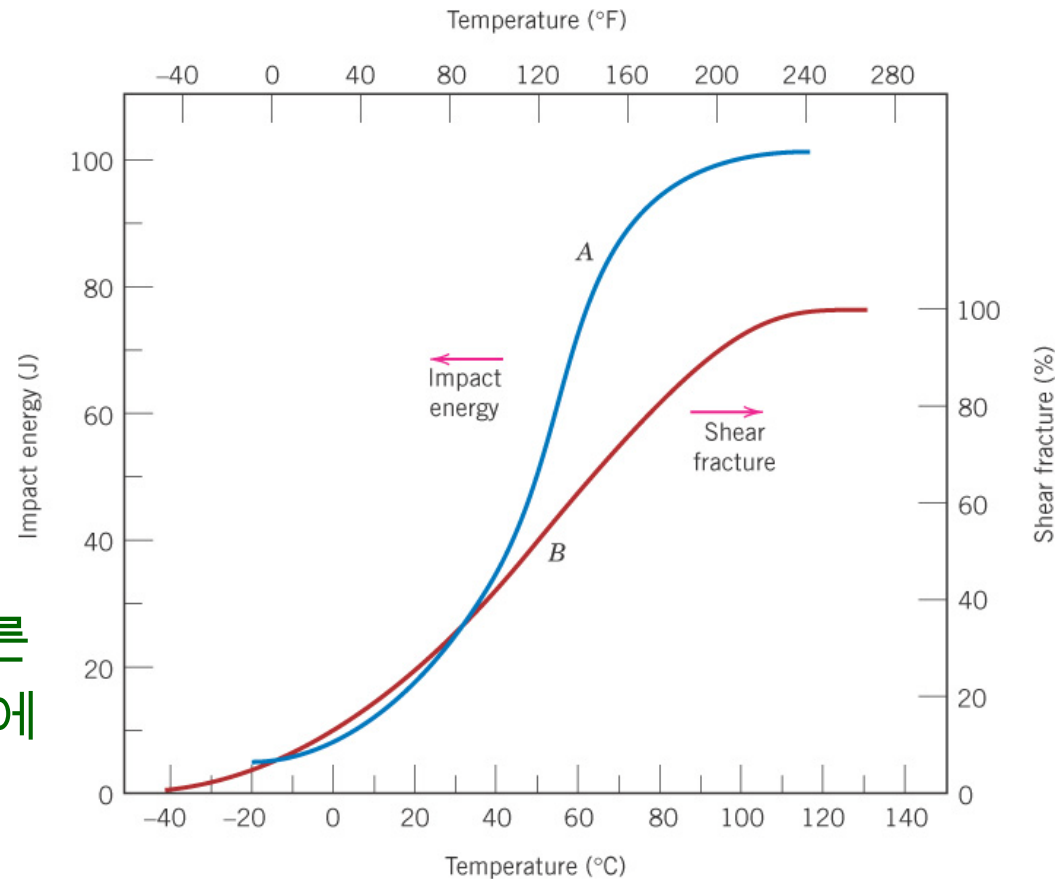
Fig. 9.18 (a) 충격 시험 시편 치수
(b) 충격 시험기의 개략도.

Ductile-to-brittle transition (연성-취성 전이)

연성 재료의 경우 온도 감소에 따라 취성으로 전이됨
충격 에너지 흡수량과 관련

연성-취성 전이 거동을 나타내는 재료는 전이 온도 이상에서 사용해야 취성 파괴 및 대형 파손을 방지할 수 있음.

Fig. 9.19 Steel (강)의 온도에 따른 CVN (Charpy V-notch) 충격 에너지 및 전단 파괴 그래프.



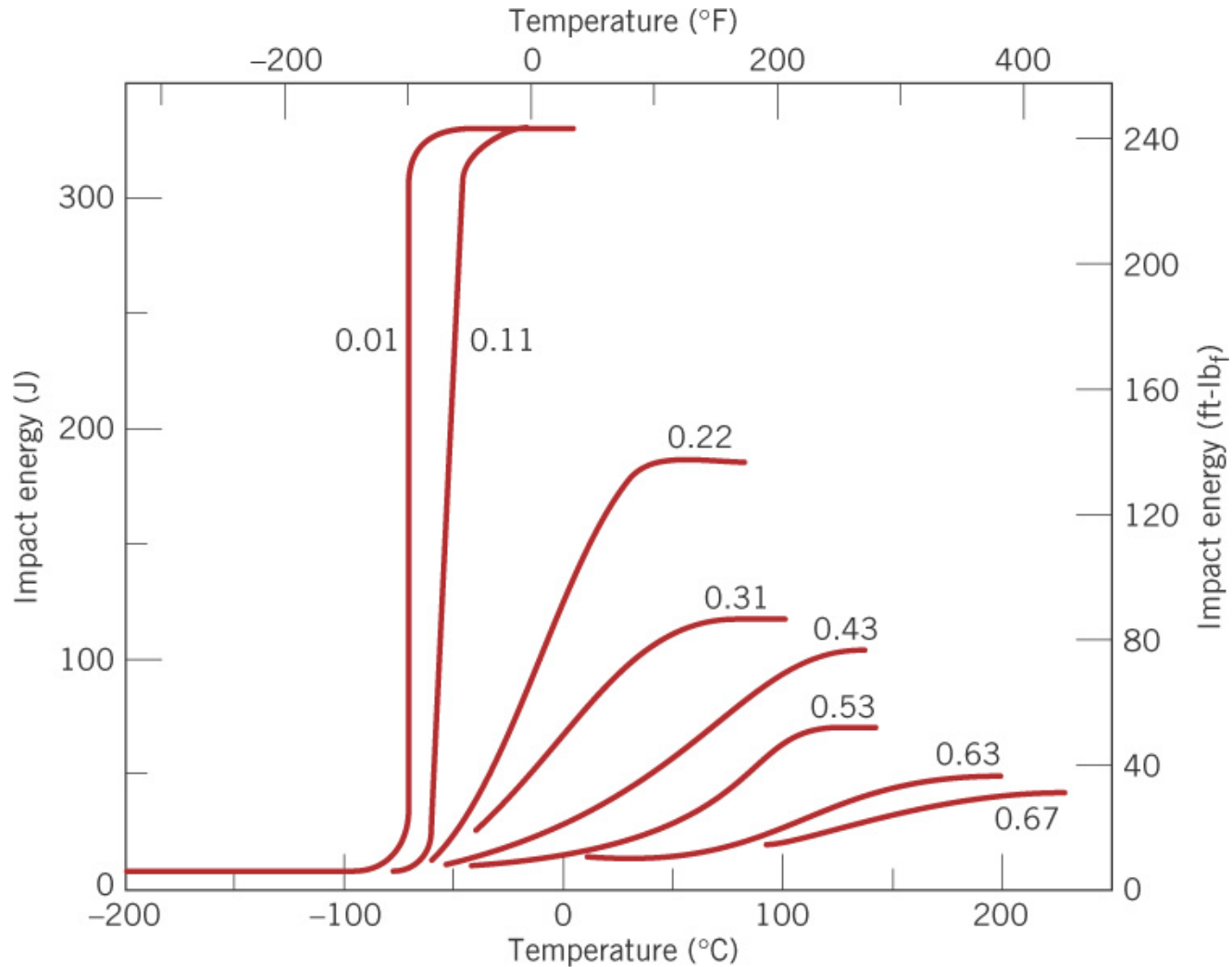


Fig. 9.22 온도에 따른 steel의 CVN 충격 에너지에 대한 탄소 함유량의 영향.

Fatigue (피로)

~ 동적이고 반복적인 하중 하에서 일어나는 파손
일반적으로 오랜 시간 응력 및 변형률 사이클이 반복된 후 발생

Cyclic Stresses

작용 응력의 종류:

- axial (tension-compression) stress (축 응력)
- flexural (bending) stress (굴곡 응력, 굽힘 응력)
- torsional (twisting) stress (비틀림 응력)

시간에 따른 변동 응력 양식:

- reversed stress cycle (교번 응력 사이클)
- repeated stress cycle (반복 응력 사이클)
- random stress cycle (불규칙 응력 사이클)

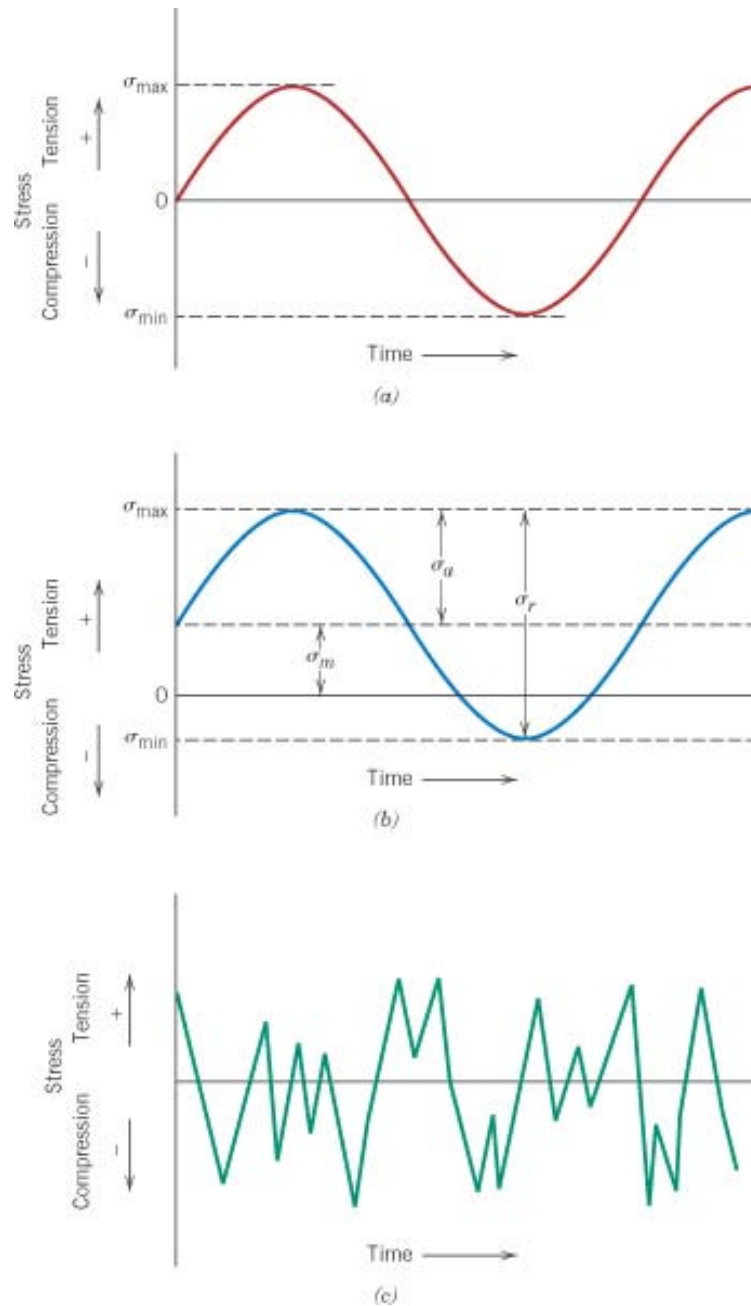


Fig. 9.23 피로 파손에서의 시간에 대한 응력의 변화: (a) reversed stress cycle, (b) repeated stress cycle, (c) random stress cycle.

- Mean stress (평균 응력): 최대 응력과 최소 응력의 평균값

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

- Stress range (응력 범위): 최대 응력과 최소 응력의 차

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

- Stress amplitude (응력 진폭): 응력 범위의 1/2

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

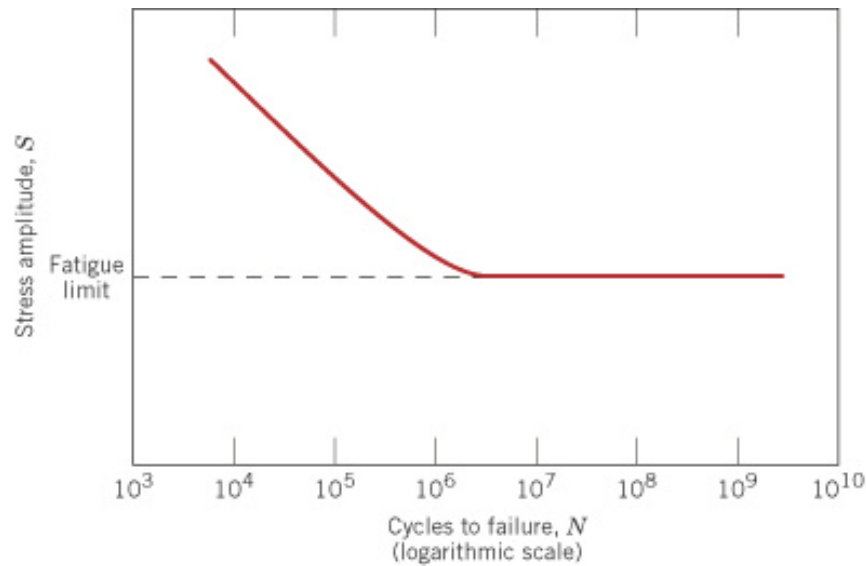
- Stress ratio (응력비): 최대 응력에 대한 최소 응력의 비

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

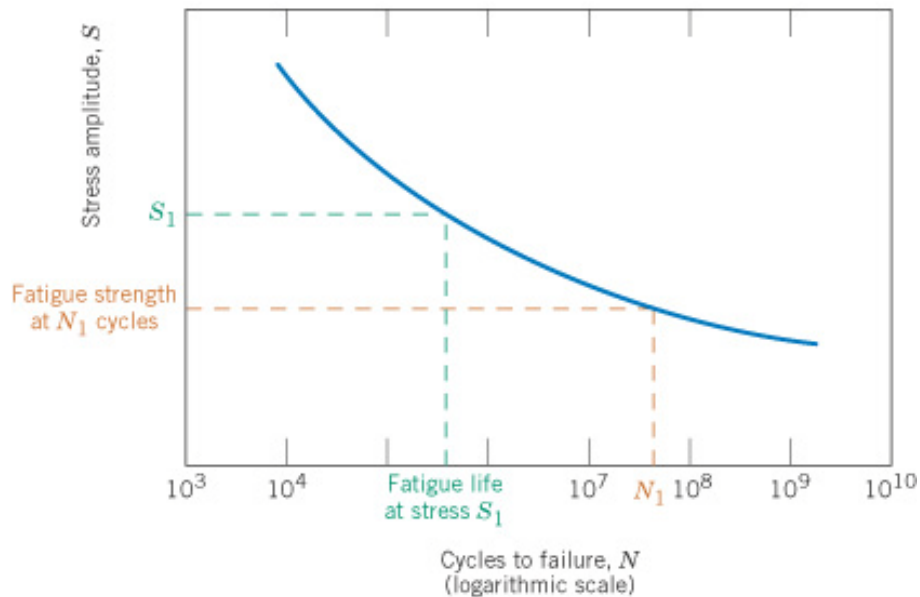
S-N Curve

~ S (stress)와 N (number of cycles) 간의 그래프

- Fatigue limit (피로 한계): 무한번 반복에도 피로 파손이 일어나지 않는 최대 응력
- Fatigue strength (피로 강도): 특정 반복횟수에서 피로 파손이 일어나는 응력의 크기
- Fatigue life (피로 수명): 특정 응력에서 피로 파손이 일어나는 반복 횟수 (cycle 수), N_f



(a)



(b)

Fig. 9.25 S - N curve:

- (a) 피로 한계를 보여주는 재료,
(b) 피로 한계가 없는 재료.

Fatigue in Polymeric Materials (고분자 재료에서의 피로)

~ 금속 재료에 비해 피로 강도와 피로 한계가 매우 작음

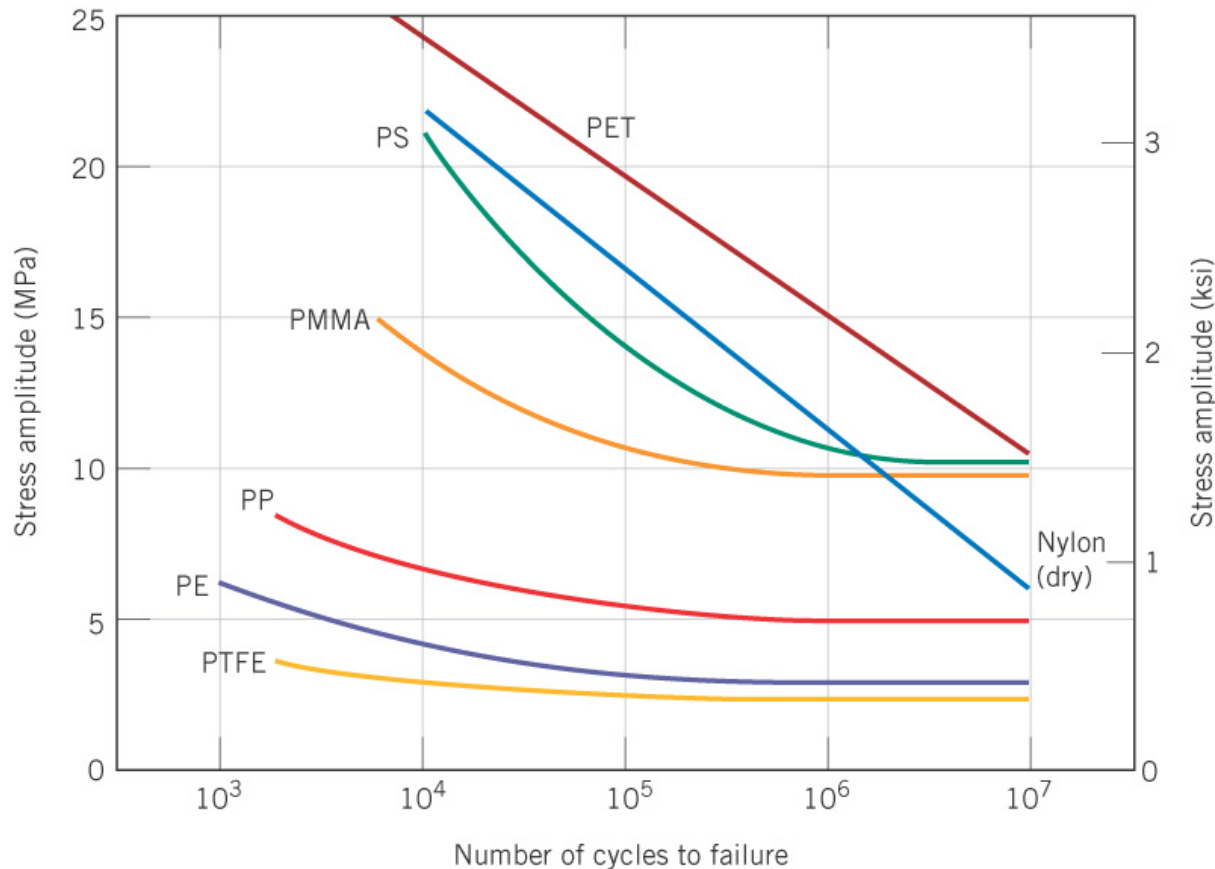


Fig. 9.25 다양한 고분자 재료의 $S-N$ curve (일부 고분자는 피로 한계를 보여 주지 않고 있음).

Factors That Affect Fatigue Life (피로 수명에 영향을 주는 인자)

. Mean stress (평균 응력)

~ 평균 응력 크기 증가할수록 피로 수명 감소 (Fig. 9.31)

. Surface effects (표면 효과)

~ 피로 파손의 대부분은 표면에서 발생

- Design factors (설계 인자)

불연속성이 클수록(곡률 반경이 작을수록) 응력 집중이 큼
기하학적 구조가 급격히 변하는 곳은 곡률 반경이 크게 설계
(Fig. 9.32)

- Surface treatments (표면 처리)

표면 경도를 향상시켜 피로 수명 향상시킴 (Fig. 9.34)

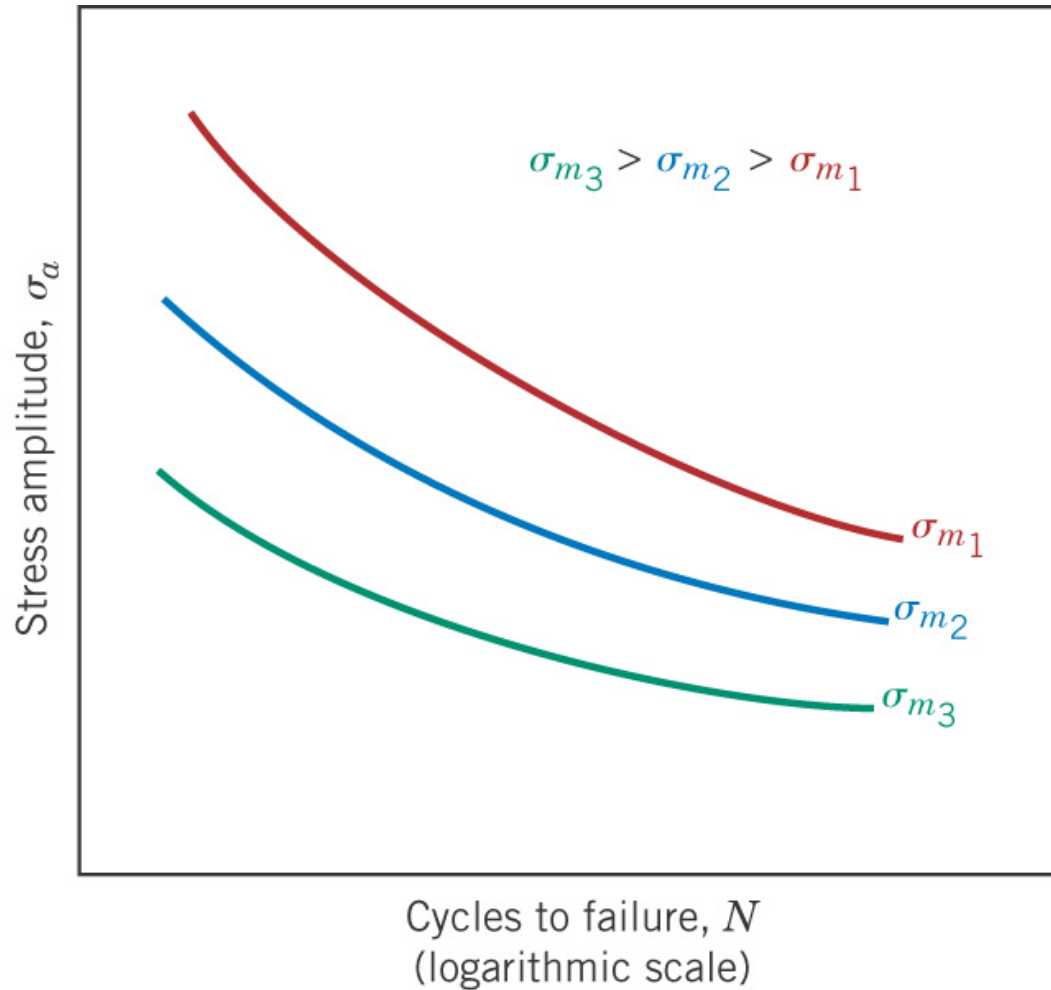


Fig. 9.31 Fatigue life (피로 수명)에 대한 평균 응력 σ_m 의 영향.

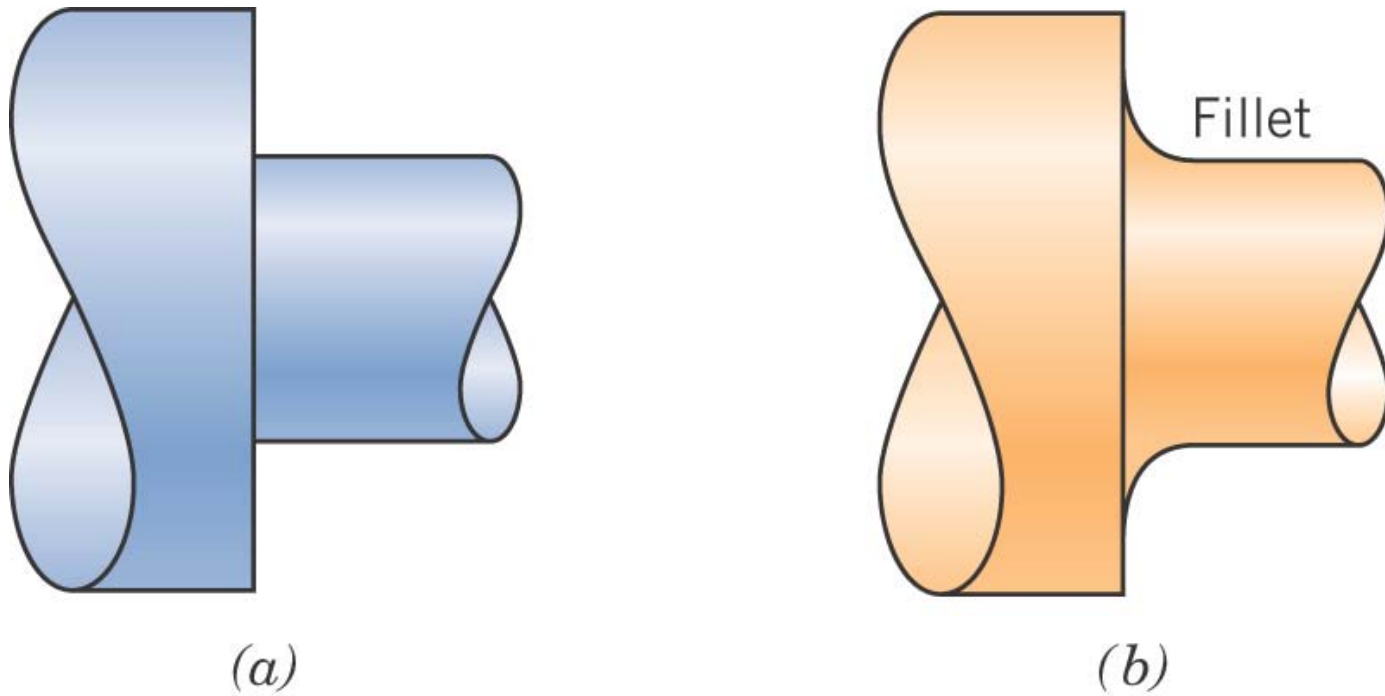


Fig. 9.32 응력 증폭을 줄일 수 있는 설계 예: (a) 나쁜 설계 (sharp corner), (b) 좋은 설계 (곡률 반지름이 큰 fillet을 붙여 피로 수명을 증진).

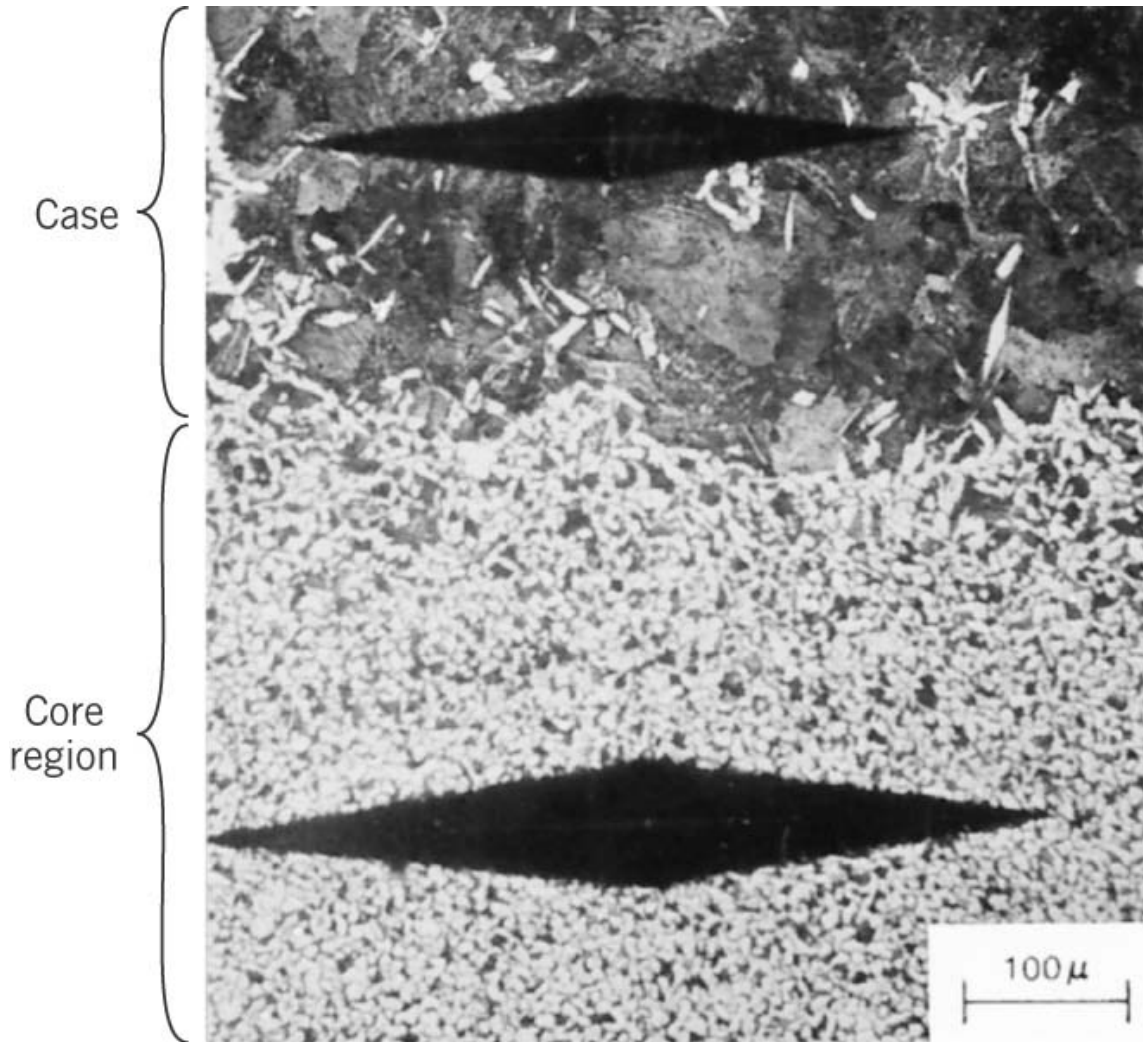


Fig. 9.34 강(steel)의 내부(core)와 탄소로 강화시킨 표면(case)을 보여주는 사진 (마름모 꼴 형상은 미세 경도 시험 자국으로 표면의 경우가 누름 자국이 작음).

Creep (크리프)

~ 일정 하중이나 응력 하에 놓인 재료의 시간에 따른 변형
금속의 경우에는 $0.4 T_m$ 이상에서 이 현상이 나타남

Creep Behavior (크리프 거동)

(Fig. 9.35)

Primary creep (1차 크리프) or transient creep (전이 크리프)

: 크리프 속도가 연속적으로 감소 (변형 경화 구역)

Secondary creep (2차 크리프) or steady-state creep (정상 크리프)

: 크리프 속도가 일정 (변형 경화와 회복이 평형인 구역)

→ steady-state creep rate $\dot{\epsilon}_s$: 장기 사용 설계용 매개변수

Tertiary creep (3차 크리프)

: 크리프 속도가 가속되어 파손이 일어나는 구역

→ rupture lifetime (파열 수명) t_r

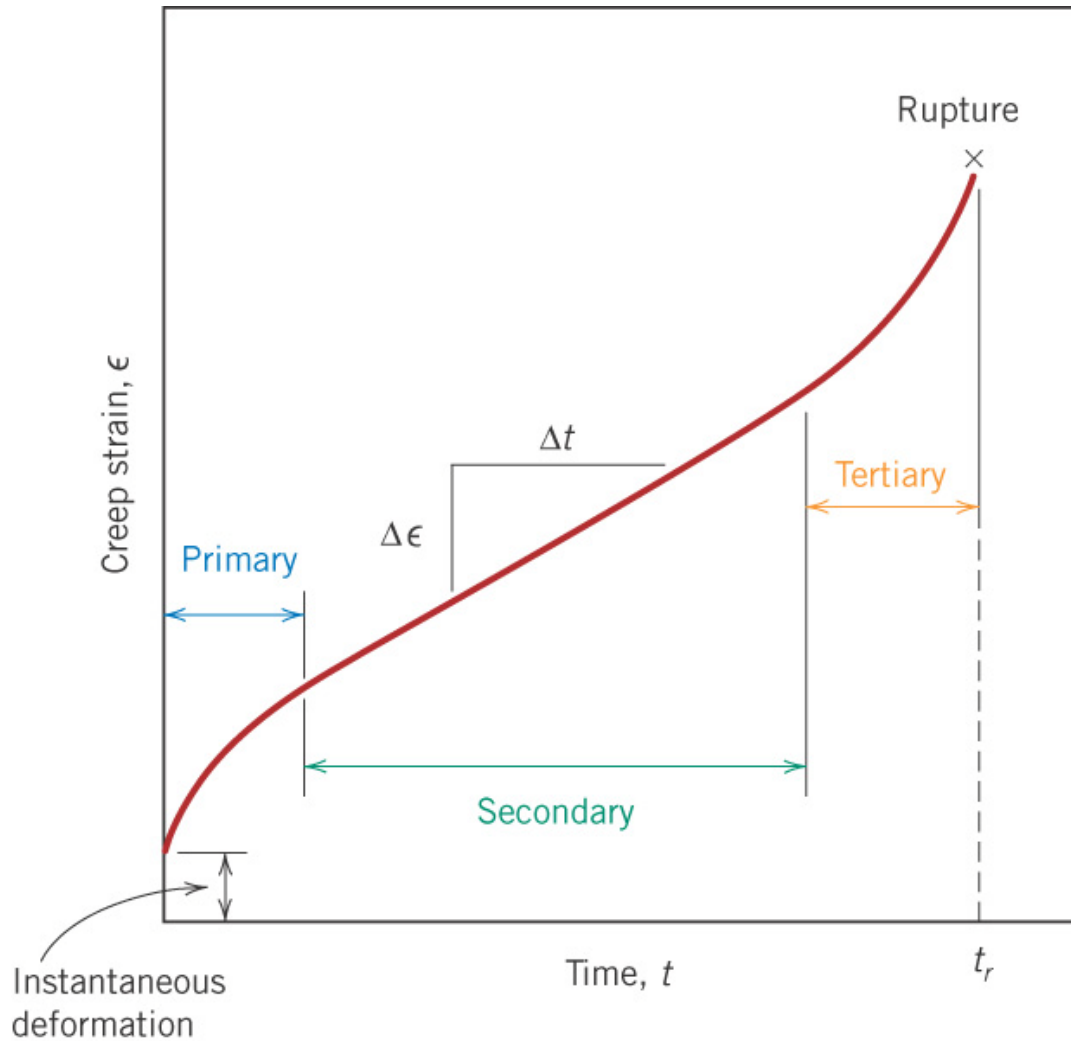


Fig. 9.35 전형적인 creep (변형률-시간) 그래프: 최소 크리프 속도 $\Delta\epsilon/\Delta t$ 는 2차 크리프 구간의 기울기이며 rupture lifetime (파열 수명) t_r 은 파열까지의 총 시간을 나타냄.

Stress and Temperature Effects (응력 및 온도 효과)

~ 온도와 작용 응력의 크기는 크리프 특성에 영향을 끼침

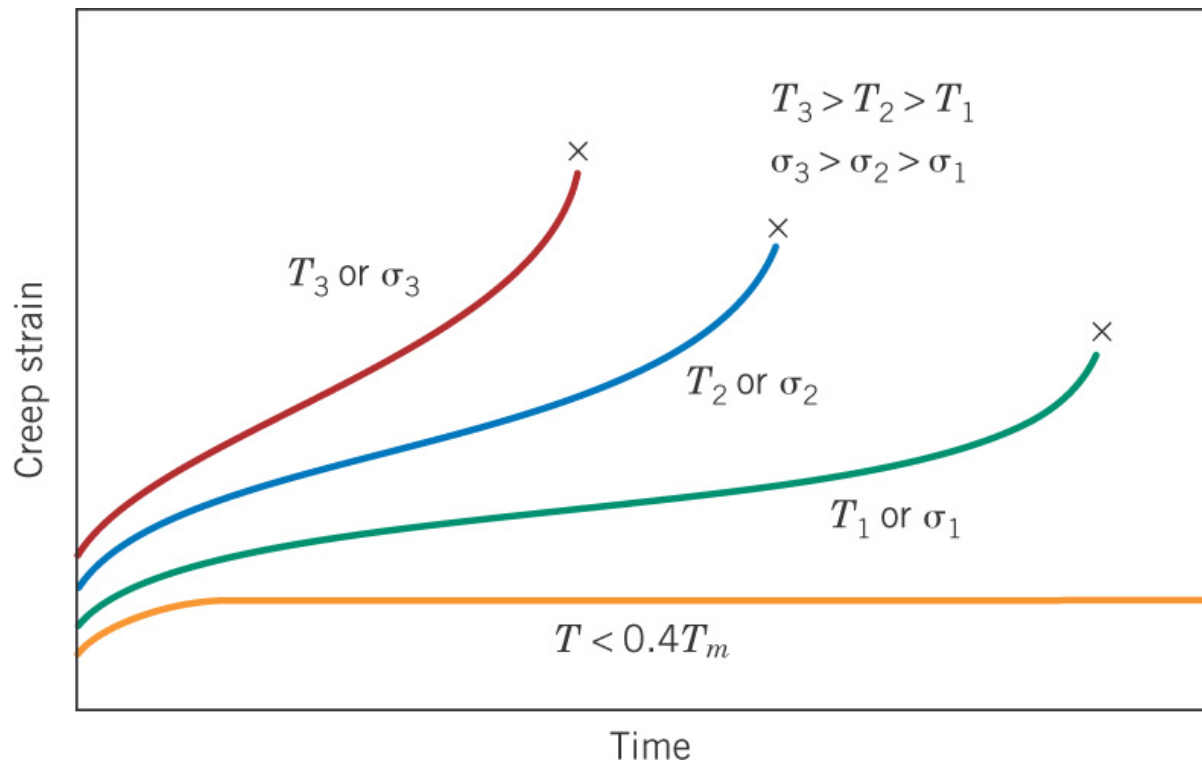


Fig. 9.36 Creep 거동에 대한 응력 σ 와 온도 T 의 영향.

Stress-rupture (응력-파열 수명) log-log 그래프 ~ 각 온도별로 선형 관계

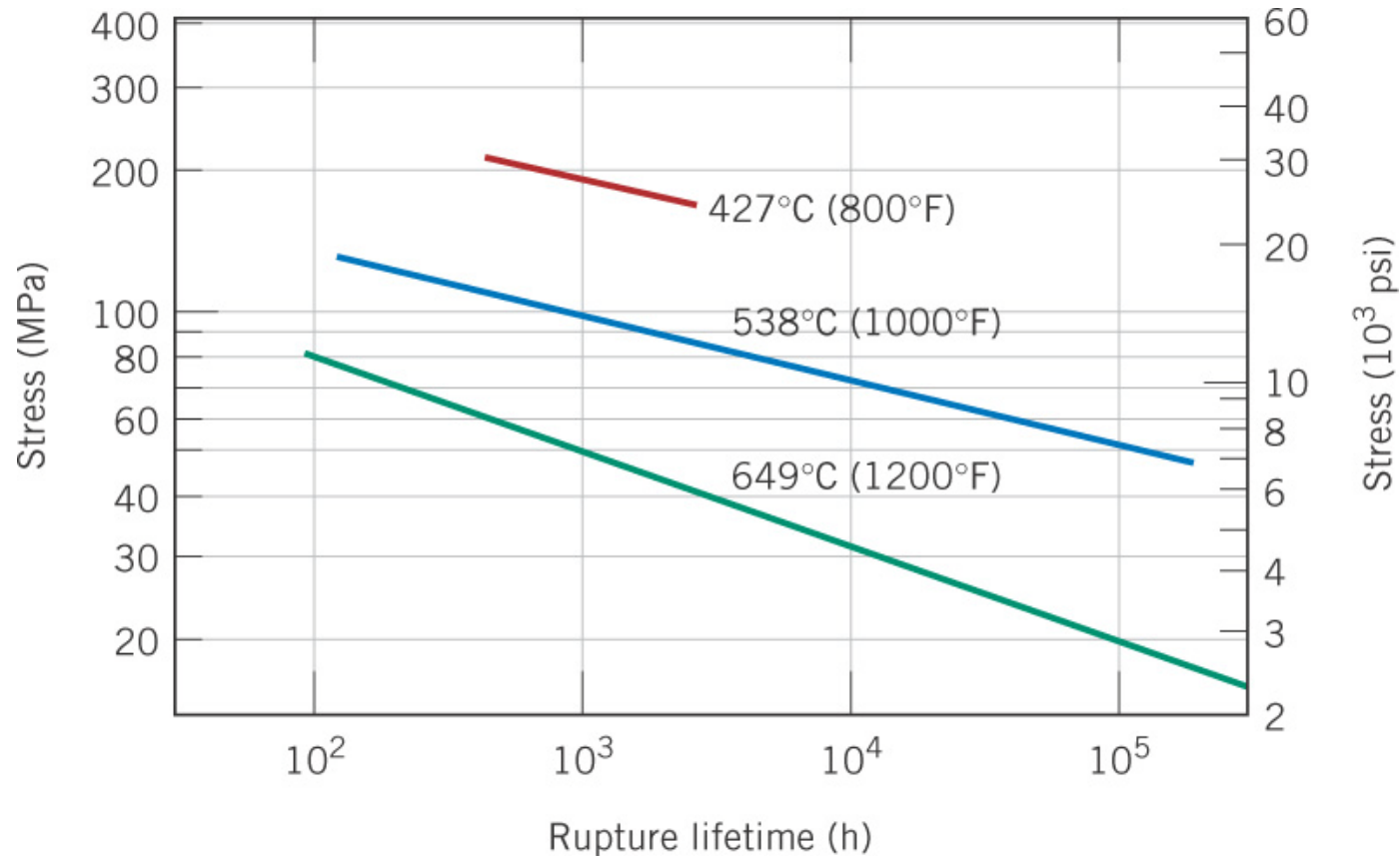


Fig. 9.37 저탄소 니켈 합금에 대한 응력-파열 수명 그래프.

- Dependence of creep strain rate on stress
(크리프 변형률 속도의 응력에 대한 의존성)

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$

← K_1, n : 재료 상수

온도 항을 포함시키면,

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

← K_2, n : 재료 상수

Q_c : 활성화 에너지

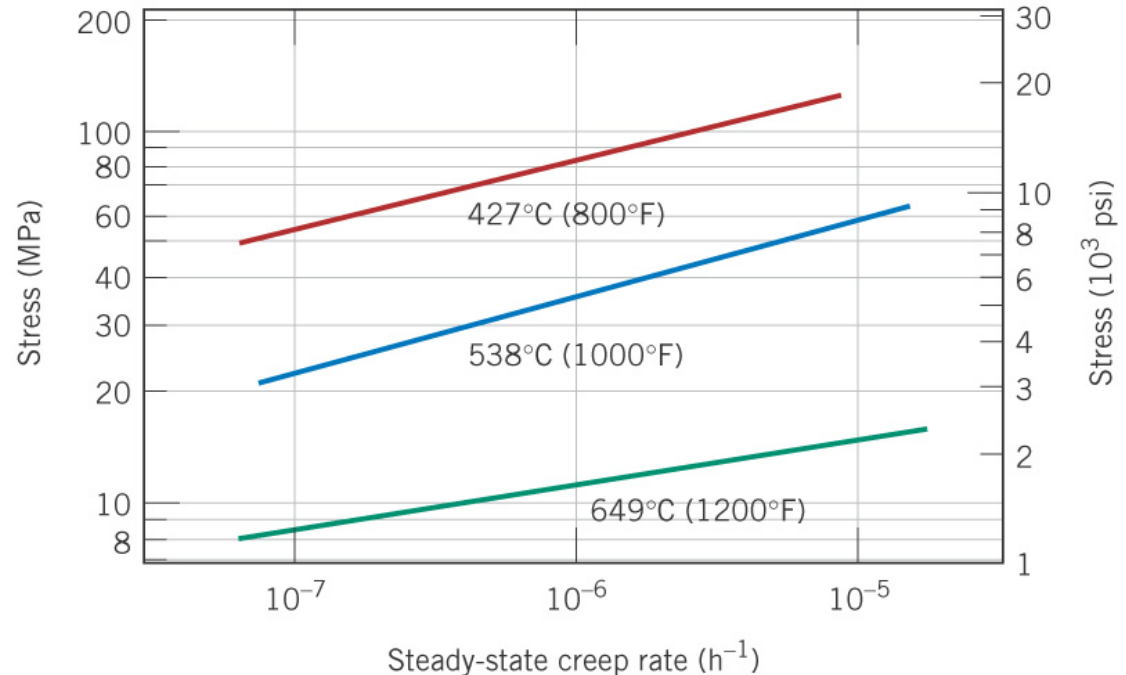


Fig. 9.38 저탄소 니켈 합금에 대한
응력-정상 크리프 속도 그래프.