



재료강도학-강의자료

# 제 7 장 피로

한밭대학교 신소재공학과 신기현

# 복습 - 6장 파괴

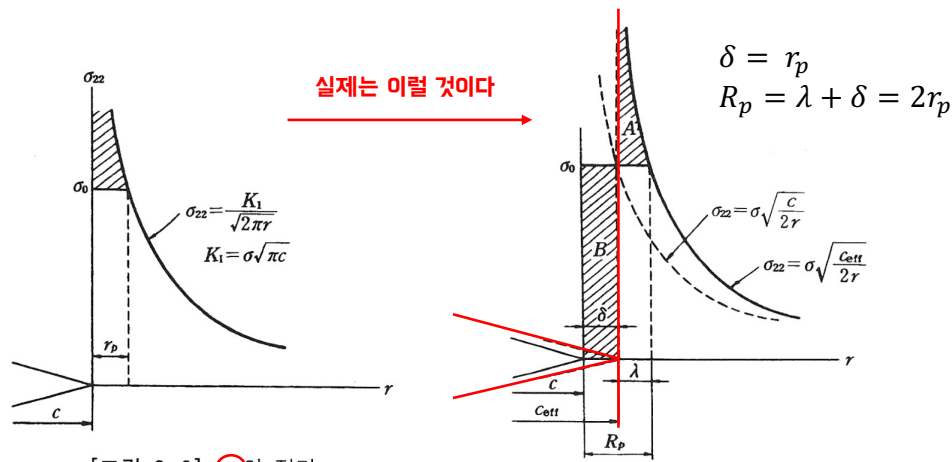
- 재료의 강도 ~ 원자 간의 응집력에 기인
- 보통 재료는 파괴강도 << 이론강도 → 재료속의 결함이나 균열로 인해

- 응력집중계수  $K_t = 1 + (0.5 \sim 2) \sqrt{\frac{a}{\rho}}$

- 응력확대계수  $K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi c}$

- 소성역의 크기  $r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_0^2}$

- Irwin의 소성역 계산



[그림 6-9]  $r_p$ 의 정리  
소성역의 크기

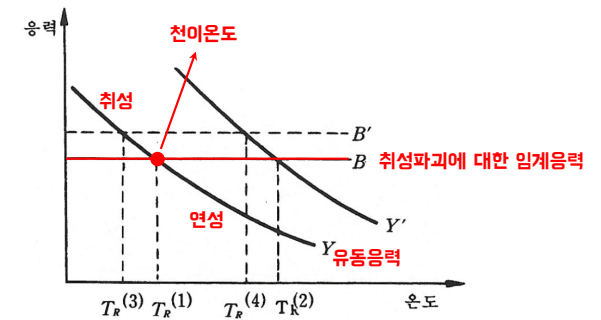
[그림 6-10] Irwin의 소성역 계산

- 임계응력확대계수:  $K_{IC}$
- 평면변형상태(두꺼운) 에서는  $K_{IC}$  는 두께와 무관한 일정한 값  
= 평면변형파괴인성 ( $K_{IC}$ )  
= 항복강도 같은 재료의 상수

- 파괴에 대한 Griffith 조건

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi c}\right)^{1/2}$$

- 연성-취성 파괴전이

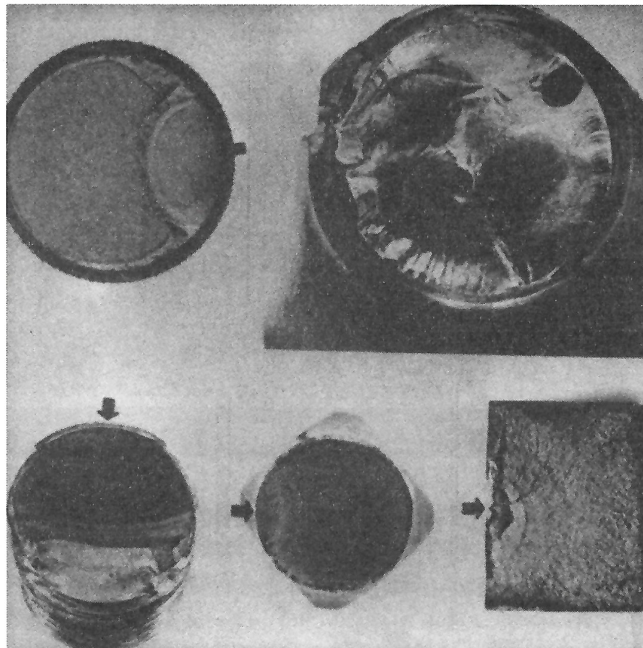


[그림 6-50] 연성-취성 천이에 대한 Davidenkov의 그림



# 7.1 서론

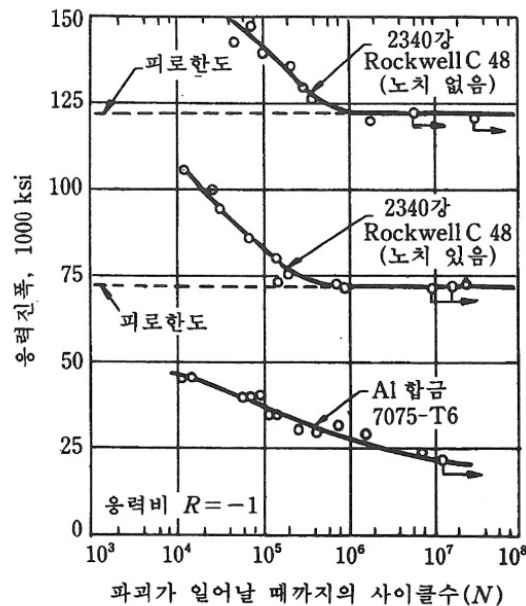
- 금속이 반복되는 응력이나 변형을 받으면 **훨씬 작은 응력**에서 파괴
- **반복하중** (혹은 변형) 을 받고 생기는 파괴를 '**피로파괴**'
- 재료를 상당한 기간 사용한 후에 일어나는 것이 보통
- 아무런 경고 없이 갑자기 일어나며 파괴 때 큰 변형 없이 취성파괴
- 보통 파괴면으로 판단 가능
  - 원형자국(흔히 해안자국, beach mark 또는 조개무늬 clam shell mark)



[그림 7-1] 피로파괴면의 예(화살표는 파괴 시작점을 가리킨다<sup>(1)</sup>)

# 7.1 서론

- 응력이 감소 → 파괴가 일어날 때 까지의 응력 사이클수가 증가
- 강이나 Ti 같은 재료의 S-N 곡선은 어떤 한계 응력에서 수평
- 이 한계응력 이하 에서는 아무리 사이클 수가 많더라도 파괴가 X → 피로한도
- Al, Mg, Cu 합금
  - 피로한도가 나타나지 않는다.
  - 이러한 경우  $10^8$  사이클에서의 응력을 → 피로강도로 사용



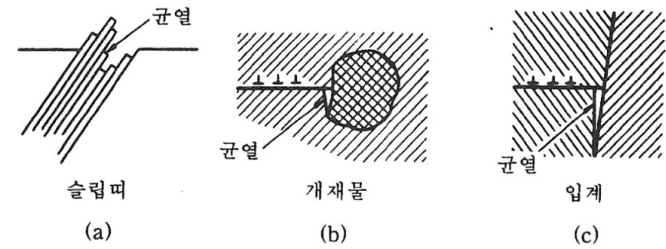
1 ksi (1000 psi) = 6.895 MPa

[그림 7-5] 강(鋼)과 Al 합금의 피로곡선(S-N 곡선)<sup>(71)</sup>



# 7.2 피로과정

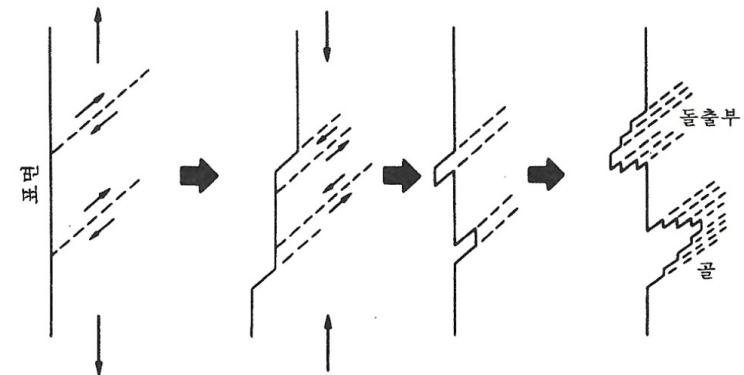
- 피로파괴 과정을 엄격히 구분하기는 어렵지만 **균열의 발생, 균열의 성장, 최종파괴의 3단계로 일반적으로 구분**



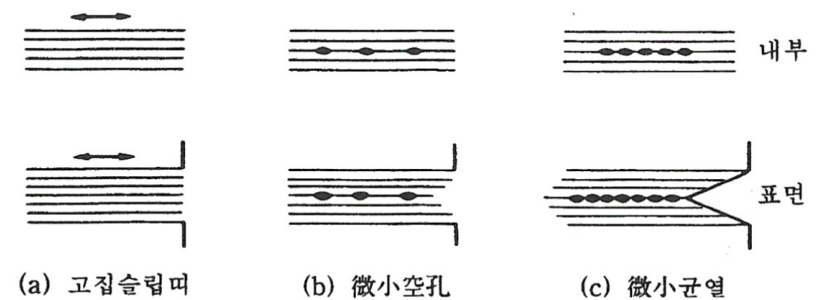
[그림 7-6] (a) 슬립띠 (b) 개재물 (c) 입계에서의 비가역변위에 의해 생긴 균열 발생의 설명도<sup>(3)</sup>

## 1. 피로균열의 발생

- **슬립띠, 개재물(불순물), 입계에서 발생**
- 반복 소성 변형 → 국부적으로 전위밀도 상승
- 응력집중으로 인해 균열 발생
- 실제로 전위밀도가 높은 물질에서 균열이 존재하는 빈도가 훨씬 큼.
- 슬립띠에 반복하중 → 고집슬립띠 형성
- **고집슬립띠는 모상에 비하여 훨씬 연함**
- 쉽게 미세공공이 형성



[그림 7-7] 피로균열발생 모형<sup>(5)</sup>



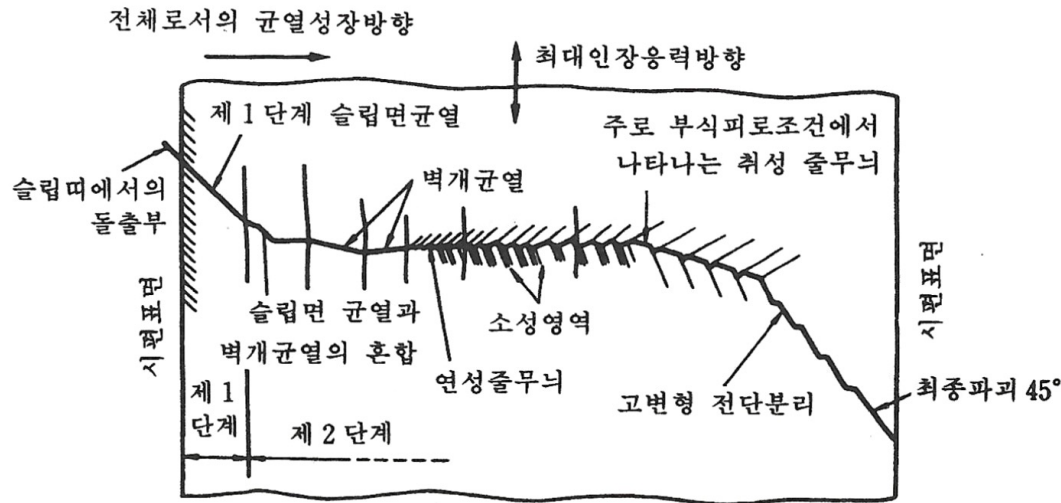
[그림 7-9] 고집슬립띠 중의 미소균열발생<sup>(4)</sup>



# 7.2 피로과정

## 2. 피로균열의 성장

- 1, 2 단계로 나누는 것이 보통
- 1 단계에서는 **최대인장응력과 45도 기울어진 면을 따라 성장**
- 이 후의 과정을 2단계 피로균열성장으로 설명
- 이 성장이 결정립을 만나면 슬립면이 달라서 성장속도가 달라지고 방향이 **인장응력에 수직하게 변화**

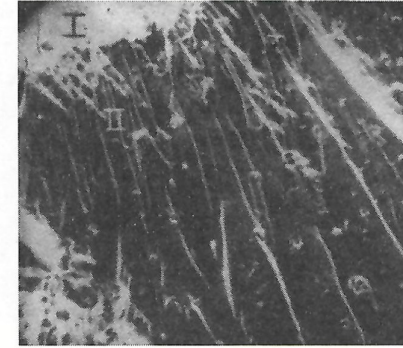


[그림 7-11] 고력 시합금에서 나타나는 각종 피로파면의 설명도<sup>(9)</sup>

# 7.2 피로과정

## 2. 피로균열의 성장

- 1단계는 줄무늬 X (전단형 균열)
- 2단계는 줄무늬 O (인장형 혹은 벽개형 균열)
- 2단계의 성장속도는 1단계 보다 크다.



[그림 7-12] Al합금(2024-T3)의 조대한 결정립을 가진 시편에서의 1단계 피로파괴로부터 2단계 피로파괴로의 전이를 나타내는 사진<sup>(10)</sup>

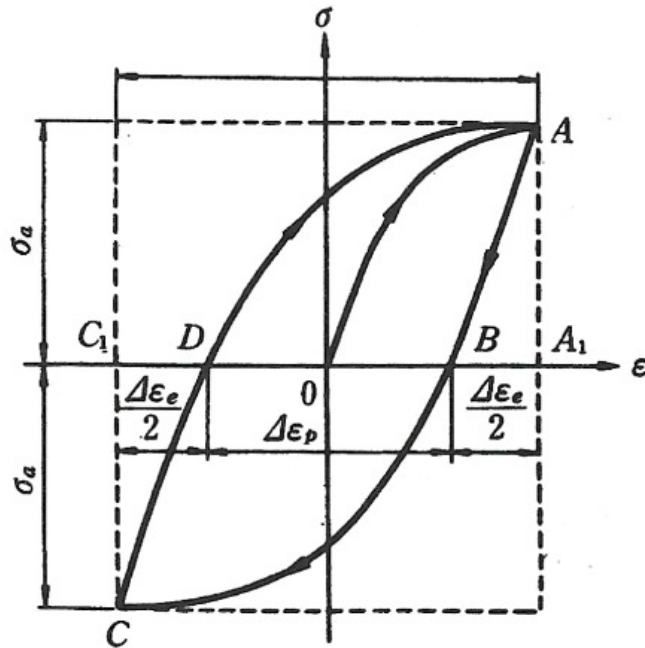
## 3. 최종파괴

- 단면이 하중을 지탱할 수 없는 **마지막 응력 사이클에서 최종파괴**
- 연성파괴 혹은 취성파괴 혹은 혼합의 형태일 수도

## 7.3 일정변형피로(저주기피로)

- 일정응력의 반복을 받는 기계나 구조물에도 그 일부에 **노치나 결함부 등의 응력집중부가 있으면, 이 부분이 국부적으로 항복 --> 일정 소성변형의 진폭을 가진 피로현상을 보임.**

→ 일정변형피로



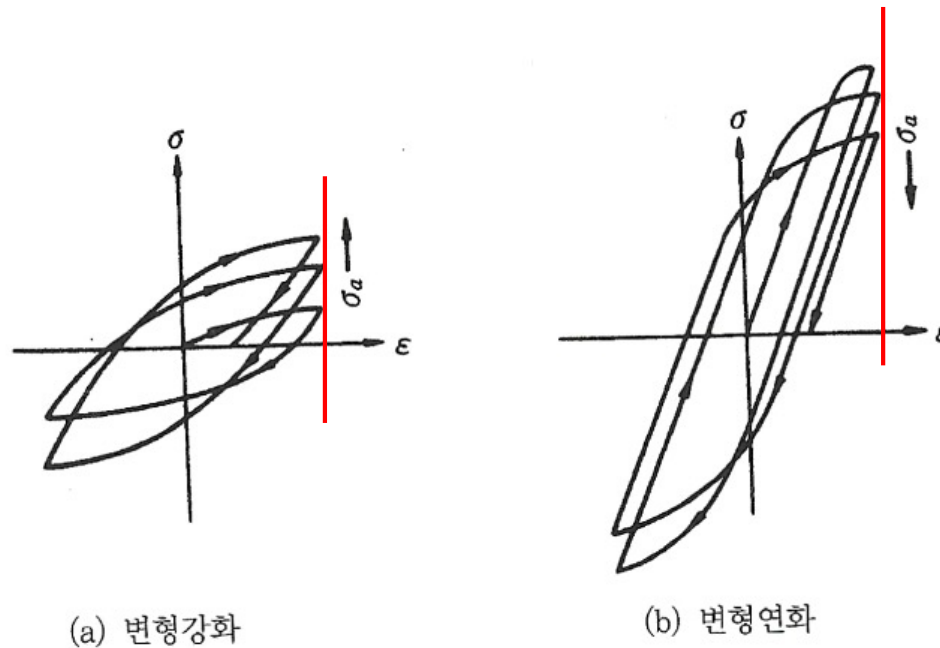
- 피로에 의한 재료의 경화 또는 연화 거동을 밝히기 위해 일정변형 진폭시험
- 총변형률폭

$$\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_p + \Delta\varepsilon_e$$

[그림 7-16] 피로시험에서의 히스테리시스 루프



## 7.3 일정변형피로(저주기피로)

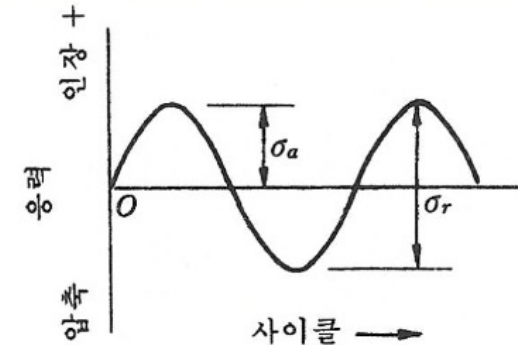


[그림 7-17] 일정변형(一定變形) 피로에서의 변형강화와 변형연화

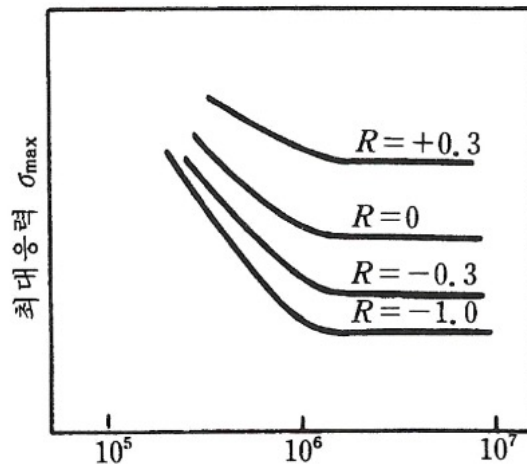
- 동일한 물질이더라도 전처리에 따라 두종류의 히스테리시스 고리의 변화가 일어난다.
- 완전히 열풀림된 강의 경우에는 반복횟수 증가 → 응력증가 → 반복변형경화현상
- 심하게 냉간가동된 재료의 경우에는 반복횟수 증가 → 응력감소 → 반복변형연화현상

# 7.4 평균응력이 피로에 미치는 영향

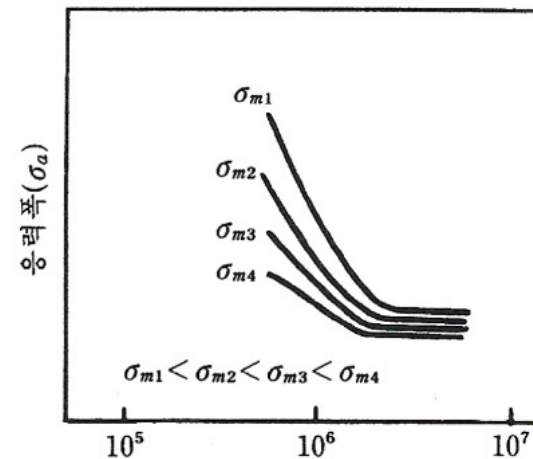
- 피로자료의 대부분은 완전역전조건 에서 결정 ( $R=-1$ )
- 그러나 종종 평균응력이 0이 아닌 응력상태가 존재
- 두가지 방법으로 표현
  1. 응력비 ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) 에 대하여 '최대응력 vs logN'
  2. 평균응력값에 대하여 '응력진폭 vs logN'



(a) 완전역전 응력사이클



(a) 파괴가 일어날 때까지의 사이클



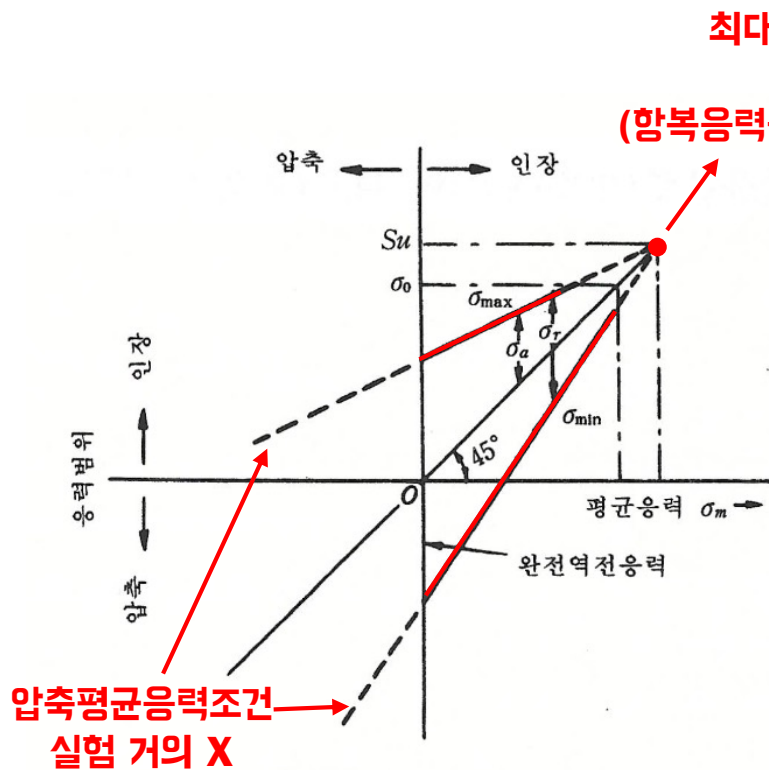
(b) 파괴 때까지의 사이클

[그림 7-23] 평균응력이 영(0)이 아닐 때 피로값을 나타내는 방법

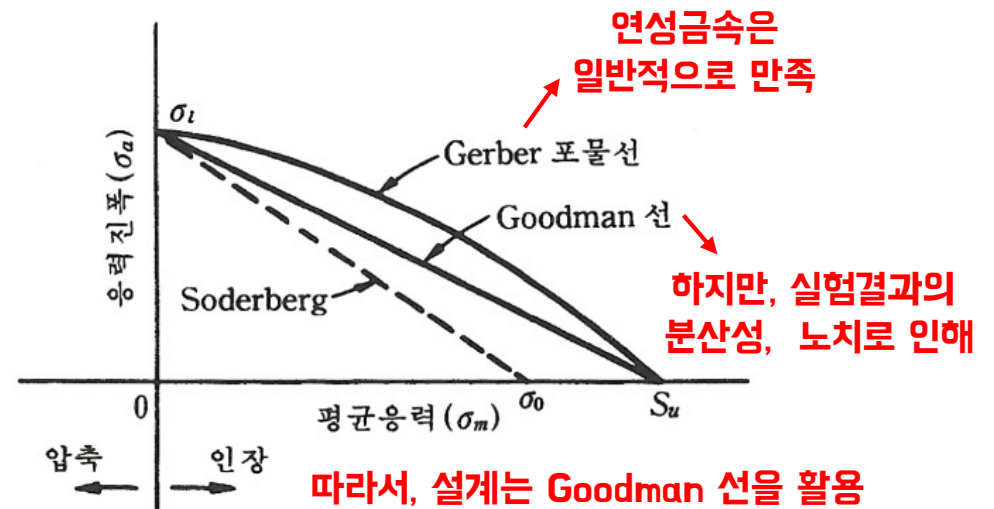


# 7.4 평균응력이 피로에 미치는 영향

- 평균응력이 다르면, 피로가 일어나지 않는 응력의 범위가 다를 수 0
- 이것을 나타내는 곡선을 Goodman 그림 (왼쪽)
- 평균응력에 대한 실험값을 나타내는 다른 방법은 Haig-soderberg 그림 (오른쪽)



[그림 7-24] Goodman 도형

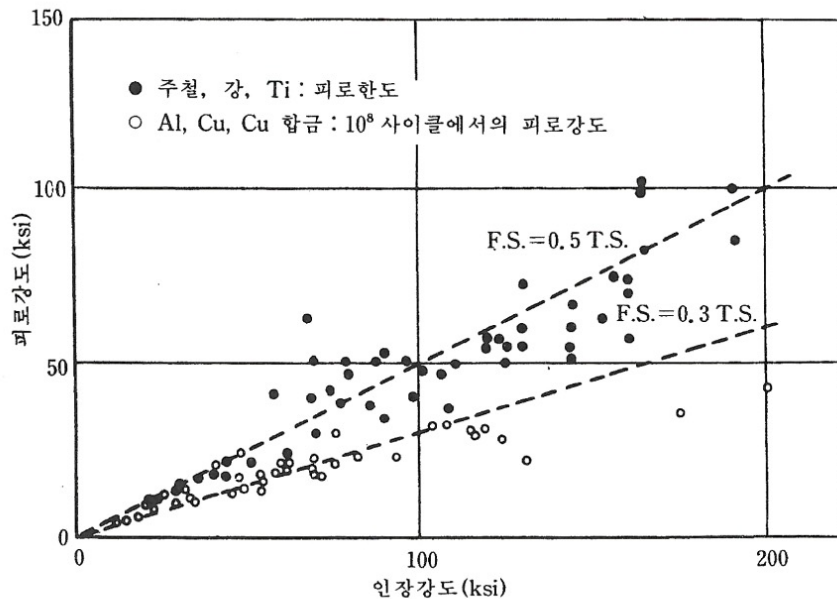


[그림 7-25] Goodman 도형을 다르게 나타내는 방법



# 7.5 금속조직학적 인자의 영향

- 피로가 소성변형과 관계
- 피로에 대한 저항이 소성변형에 대한 저항과 관계가 있을 것이 예상
- 약간의 가공경화가 존재 → 피로강도와 인장강도가 상관관계가 있을 것으로 예상



[그림 7-26] 피로강도 F.S.와 인장강도 T.S.와의 상관관계<sup>(26)</sup>

- 철합금, Ti: 피로강도 = 1/2 \* 인장강도
- Al, Cu 합금: 피로강도 = 1/4~1/3 \* 인장강도
- 피로한도/인장강도 = 피로비
- 피로한도 (또는 10<sup>8</sup> 사이클에서의 피로강도)
- 실험에서 완전역전피로시험 일 경우만 피로비 만족
- 노치를 가진 강에서 피로비는 0.2 ~ 0.3

## 7.6 응력집중의 영향 (노치의 영향)

- 노치나 구멍 같은 응력집중부 → 피로강도 크게 감소
- 피로균열은 일반적으로 응력집중부에 발생
- 피로파괴를 최소화하기 위해선 → 응력집중부가 생기지 않도록 설계
- 인장시편에 노치가 있으면 다음과 같은 효과가 생긴다.
  1. 노치의 뿌리에 응력집중
  2. 노치의 뿌리로부터 시편의 중심으로 응력경사
  3. 3축 응력상태
- 노치로 인해 시편의 피로한도가 감소, 이 정도를 피로강도감소계수 또는 피로 노치계수 ( $K_f$ )

$$K_f = \text{노치없는 시편의 피로한도} / \text{노치있는 시편의 피로한도}$$

- 노치의 심한정도, 노치의 형태, 재료, 부하형태, 응력에 따라 변화



## 7.7 표면성질의 영향

- 실질적으로 모든 피로파괴는 **표면에서 시작**
- 보통의 부하의 경우 최대응력이 표면에서 일어나기 때문
- 즉, 피로성질은 **표면조건에 매우 민감**
- 표면에 영향을 주는 인자는 대략 세가지

### 1. 표면 거칠기 (조도)

- 시편을 매끈하게 연마, → 피로수명이 늘어

### 2. 표면성질의 변화

- 강이 침탄 (C)이나 질화 (N)로 표면경도나 강도가 증가 → 피로성질이 현저히 향상
- 표면경화 시편에서는 표면보다는 경화층과 연질층 사이의 계면에서 파괴가 시작

### 3. 표면잔류응력

- 재료가 외력이나 온도변화가 없는데도 재료 속에 남아 있는 응력
- 불균질 소성 변형때문에 생긴다.
- 표면에 압축잔류응력이 형성되면 → 피로성질이 현저히 증가



## 7.8 온도의 영향

### 1. 저온피로

- 실온 이하의 온도에서, 온도가 감소 → 피로강도 증가
- 강의 피로 성질이 **저온에서 노치에 더 민감**

### 2. 고온피로

- 일반적으로 금속의 **피로강도는 실온 이상으로 온도 증가할수록 감소**
- 연강은 예외로 200~ 320도에서 피로강도 최대
- **온도가 훨씬 높으면 크리프가 중요**
- **온도 증가로 피로파괴에서 크리프파손으로 천이**
- 보통 결정립내 피로파괴 → 결정립간 크리프 파괴

### 3. 열피로

- 고온 피로파괴에서 **응력의 기계적 이유일 필요는 X**
- **온도 변화에 의한 열응력도 가능**
- 한번의 열응력에 의해 파괴 → 열충격
- 작은 열응력의 반복에 의한 파괴 → 열피로



## 7.9 부식피로

- 반복응력과 화학적 부식의 동시작용 : 부식피로
- 응력을 받지 않아도 부식을 받나 금속표면에 피트(pit)가 형성 가능 → 피트가 노치로 작용하여 피로강도가 감소
- 부식과 피로하중이 동시 → 피로강도가 현저히 감소
- 피로와 부식이 동시에 일어날 때 화학적 부식으로 인해 피로균열의 전파속도가 가속
- 부식은 시간에 의존 → 시험속도가 빠르면 부식에 의한 손상비율이 작아
- 응력 파형에 따라서 부식피로 균열속도가 달라질 수 0  
→ 부동태피막의 형성으로 인한 부식억제와 이 피막의 파괴로 인한 부식속도가 응력파형에 따라 다를 수 있다는 데 기인
- 응력의 반복작용 → 표면산화피막 국부적 파괴 → 피트로 작용
- 부식피로를 막기 위해서 내식성 고려, 표면압축잔류응력, 부식억제제

