



재료강도학-강의자료

# 제 6 장 파 괴

한밭대학교 신소재공학과 신기현

# 복습 - 제 5 장 결정의 강화

- 슬립 = 전위의 이동 = 소성변형
- 전위의 이동을 막으면 → 강화가 일어난다.
- 장벽을 세우거나, 전위의 에너지를 낮추어 전위 이동의 구동력을 줄여주어야 한다.

## • 단결정의 변형경화

$$\tau \propto \frac{Gb}{l} \quad \tau = \tau_i + \alpha Gb\sqrt{\rho}$$

## • 결정립계에 의한 강화

$$\sigma_0 = \sigma_i + k'D^{-1/2} \quad \text{Hall-Petch equation}$$

## • 소각입계에 의한 강화

소각입계 (아결정립계) = 칼날전위의 저에너지배열

## • 석출 및 분산 경화

$$\tau_0 = \frac{Gb}{l}$$

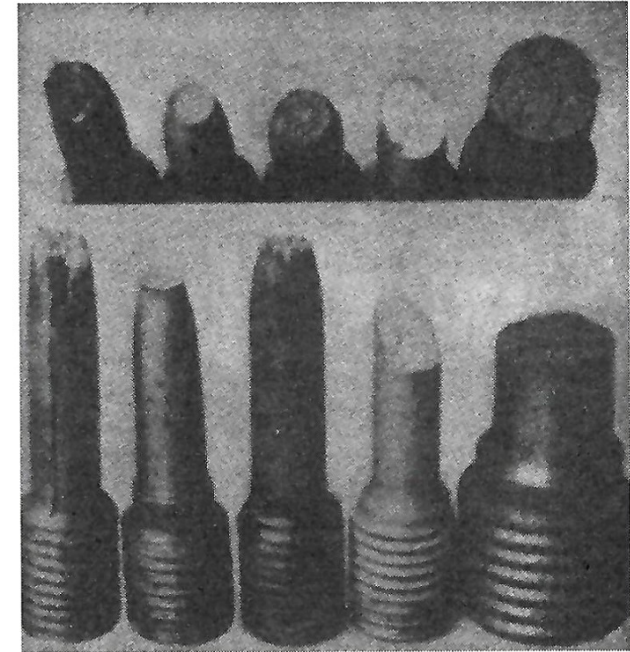
## • 고용 강화

- 고용강화는 용질원자와 전위의 상호작용에 기인
- 다음과 같은 상호작용기구가 제안됨
  1. 탄성 상호작용 (앞에서 다룸)
  2. 탄성계수 상호작용 (앞에서 다룸)
  3. 전기적 상호작용
  4. 적층결함 상호작용 (앞에서 다룸)
  5. 단범위규칙도 상호작용
  6. 장범위규칙도 상호작용



# 6.1 서론

- 파괴 : 고체가 응력의 작용으로 2개 이상의 부분으로 분리되는것
- 파괴의 과정: 균열의 발생 + 전파
- 파괴 전 소성변형의 유무에 따라 : 연성파괴 와 취성파괴
- 연성파괴: 균열의 전파 전과 중에 상당한 소성변형
- 취성파괴: 소성변형이 거의 X, 균열의 전파속도가 매우 빠름
- 온도가 낮을수록, 변형속도가 증가할수록 취성파괴가 일어날 경향이 증가.
- 취성파괴는 예고없이 일어나고, 그 결과 큰 피해가 생기는 것이 보통.



(a) (b) (c) (d) (e)

- (a) 연철(鍊鐵)(용재(鎔滓)를 보여주는 거친 파괴)
- (b) 열처리(熱處理)된 합금강(완전한 컵-원뿔형 파괴)
- (c) 열처리된 합금강(꽃모양 파괴)
- (d) 열처리된 Duralumin(전단파괴)
- (e) 회주철(灰鑄鐵)(결정립 모양 파괴)

[그림 6-1] 전형적인 인장파괴<sup>(1)</sup>

# 6.2 재료의 이론 응집력

- 재료의 강도 ~ 원자 간의 응집력에 기인
- 일반적으로 탄성계수↑, 융점↑, 열팽창계수↓ → 응집력 ↑

$$\sigma_c = \left( \frac{E \gamma_s}{a_0} \right)^{1/2}$$

$E$ : young's modulus  
 $\gamma_s$ : 단위면적당 표면에너지  
 $a_0$ : 원자간 간격

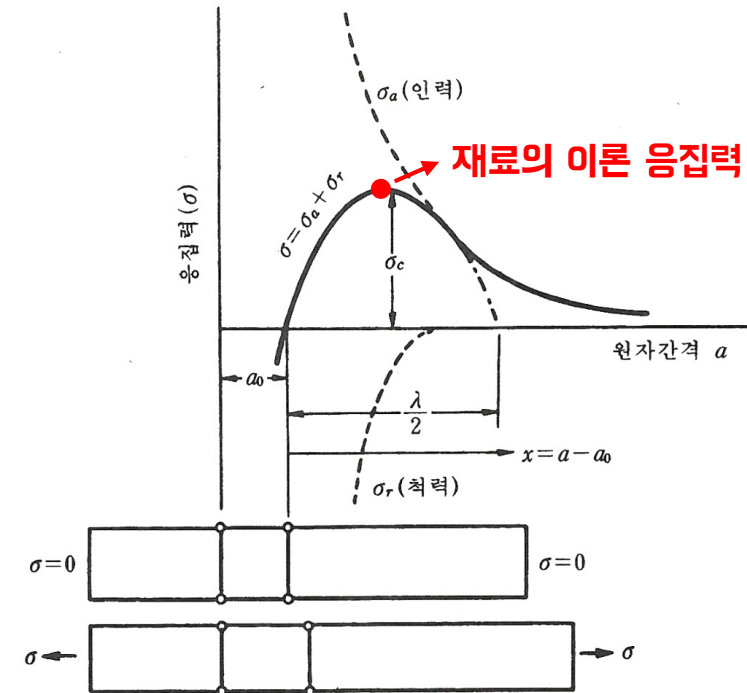
$$\sigma_c \approx \frac{E}{10} \text{ (보통 재료의 파괴 강도 보다 } 10 \sim 1,000 \text{ 배)}$$

[표 6-1] 재료의 표면에너지, 탄성계수, 원자간격

재료	표면에너지 [J/m <sup>2</sup> ]	탄성계수 [Pa]	원자간격 [m]
전형적인 값	1	10 <sup>11</sup>	3 × 10 <sup>-10</sup>

[표 6-2] 재료의 최대강도<sup>(2)</sup> [GPa]

재료	강도 $\sigma_f$	탄성계수 $E$	$E/\sigma_f$
SiO <sub>2</sub> 섬유	24.1	97.1	4
철 위스커	13.1	295.2	23
Si 위스커	6.47	165.7	26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 위스커	15.2	496.2	33
오스포밍처리강	3.14	200.1	64
피아노 선	2.75	200.1	73



[그림 6-2] 응집력과 원자간격과의 관계

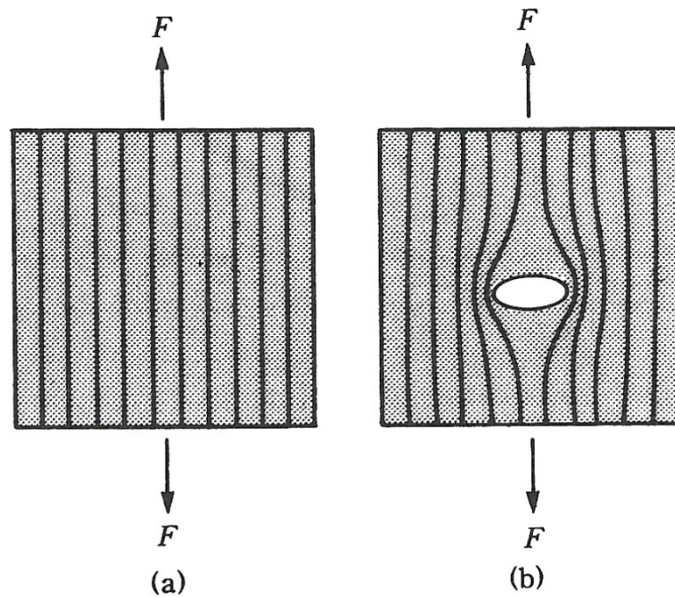
- 결함이 없는 위스커, SiO<sub>2</sub> 섬유 → 파괴강도 ~ 이론강도
- 보통재료는 파괴강도 << 이론강도 → 재료속의 결함이나 균열로 인해



## 6.3 응력집중

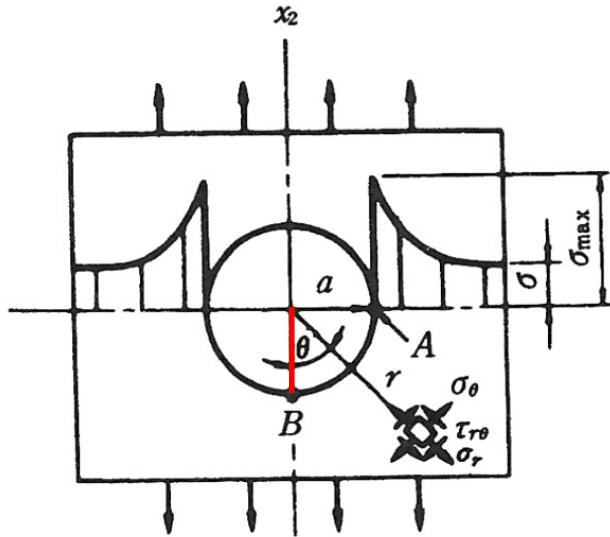
- 물체에 구멍이나 노치 같은 불연속부 → 근처에서의 응력은 더 크다.
- 불연속점 근처에서 단위면적당 힘 선의 숫자가 커짐 → 응력의 집중
- 불연속부 ~ 응력집중부
- 응력집중의 정도는 **응력집중계수** (stress concentration factor,  $K_t$ )로 정의

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$



[그림 6-3] 힘선의 분포

# 6.3 응력집중



(a) 원형

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{\sigma}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\
 \sigma_\theta &= \frac{\sigma}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma}{2} \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\
 \tau_{r\theta} &= - \frac{\sigma}{2} \left( 1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta
 \end{aligned} \right\} (6.11)$$

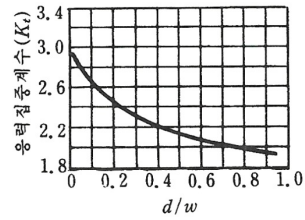
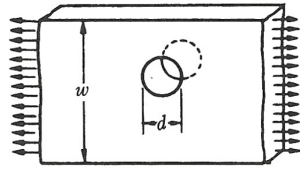
- 점 A ( $\theta = \frac{\pi}{2}, r = a$ )에서 최대응력이 일어남. ( $\theta = 0$  or  $\frac{\pi}{2}, r = a$  or  $2a$  일 때 계산 해보세요)

$$\sigma_\theta = 3\sigma = \sigma_{max}$$

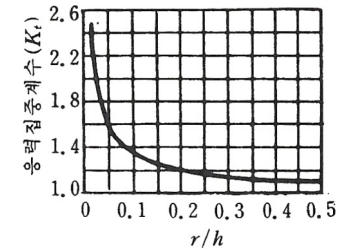
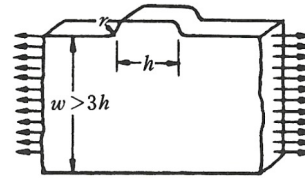
- 그래서, 이론응력집중계수  $K_t$ 는 3이다.



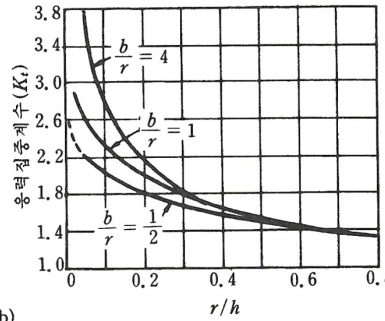
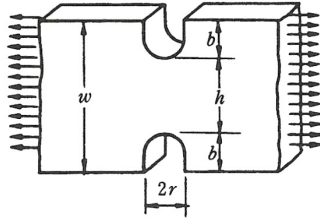
# 6.3 응력집중



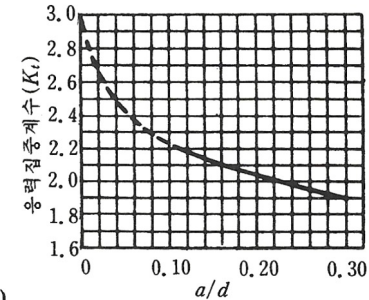
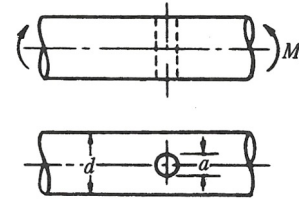
(a)



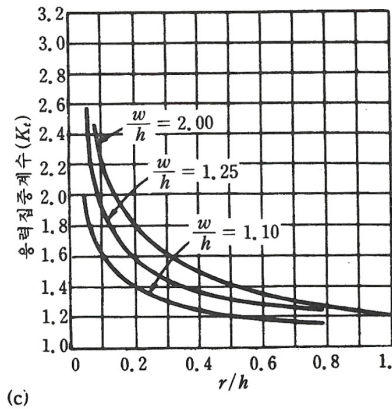
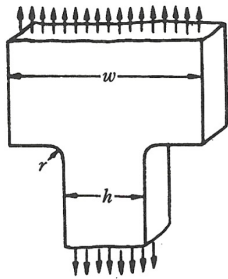
(d)



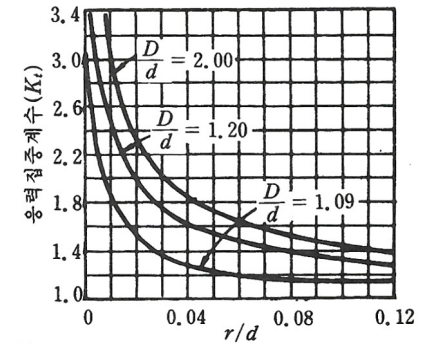
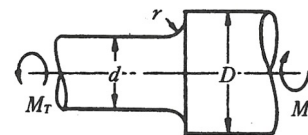
(b)



(e)



(c)



(f)

[그림 6-5] (계속)

[그림 6-5] 여러 가지 모양의 이론응력집중계수<sup>(5)</sup>

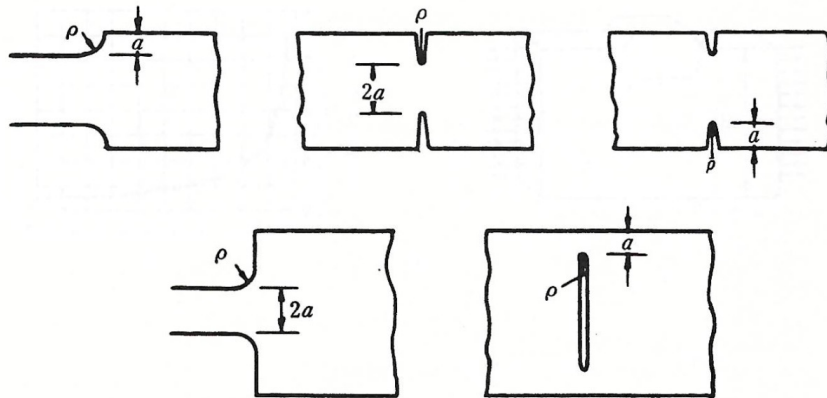


## 6.3 응력집중

- 탄성응력집중의 수학기산은 매우 어려움 → 간단한 모양만 계산
- 광탄성해석으로 실험하여 복잡한 모양을 측정 가능 (앞의 그림)
- 이런 실험 데이터를 모두 모아, **근사적 실험식**으로 나타낼 수 있음.

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

$a$ : 물체의 가장 작은 부분의 치수  
 $\rho$ : 응력집중부의 곡률반지름



[그림 6-6] 식 (6.19)의  $a$ 와  $\rho$ 의 정의

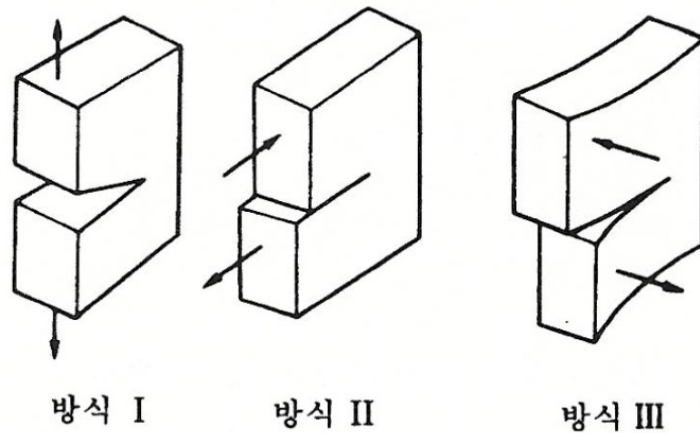
- 타원형 구멍에 작용하는 평면인장응력의 경우 / 노치를 가진 봉재의 인장 = 계수 **2**
- 곡률이 둔한 필릿 / 굽힘 및 비틀림의 경우 / 노치의 각이 클 경우 = **0.5**



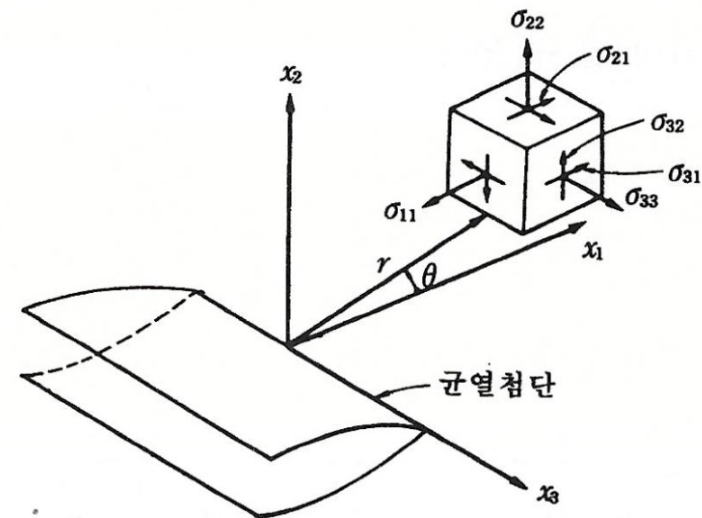
## 6.4 균열침단의 응력장

- 균열면의 변위와 관련된 3가지 부하방식

1. 변위가 균열표면에 수직인 균열표면이 벌어지는 방식 (가장중요)
2. 변위가 균열표면에 놓여있고, 균열의 침단에 수직 (혹은 미끄럼방식)
3. 변위가 균열표면에 놓여있고, 균열의 침단에 평행 (혹은 찢는 방식)



[그림 6-7] 균열에 응력을 가하는 방식



## 6.4 균열첨단의 응력장

- $r \ll c$  일때의, 응력 (균열 근처)

$$\sigma_{11} = \sigma \left( \frac{c}{2r} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{22} = \sigma \left( \frac{c}{2r} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

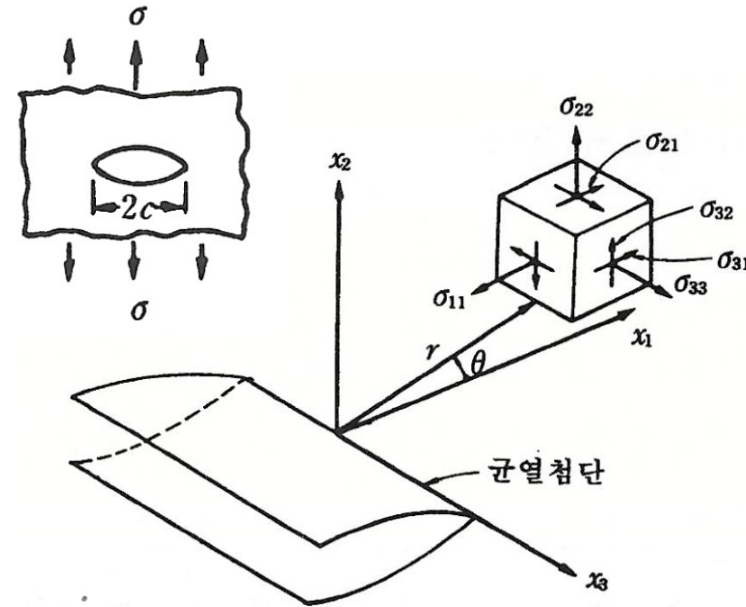
$$\sigma_{12} = \sigma \left( \frac{c}{2r} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$$

$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \text{ (평면변형률상태)}$$

$$\sigma_{33} = 0 \text{ (평면응력상태)}$$

- 응력은 외부작용응력  $\sigma$  에 비례, 균열크기의 제곱근에 비례
- 균열에 가까이 갈 수록 무한대로 접근
- $r$  이 커지면  $\sigma_{22}$  가  $\sigma$  에 수렴 해야 하는데, 0으로 수렴 (왜냐면, 초기조건이 균열 근처라서)



## 6.4 균열첨단의 응력장

- 위의 식은 다음과 같이 다시 변형 가능

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad \text{여기서, } K_I = \sigma\sqrt{\pi c}$$

- $K_I$  는 응력확대계수 (stress intensity factor)
- 앞의 응력집중계수와는 완전히 다르다. (단위도 다름)
- 응력확대계수를 알면, 균열첨단 부근의 응력장을 알 수 있다.
- 예) 길이가  $4c$  인 균열,  $\sigma$  응력을 받고 있고, 길이가  $c$  인 균열이  $2\sigma$  의 응력을 받고 있으면, 두 균열의 **첨단 주위의 응력장이 동일**
- 위 식은 탄성영역에서만 작용하는 탄성해
- **균열첨단에서 응력이 무한인데 → 불가능 → 실제로는 소성변형이 일어나 응력이 유한**



## 6.4 균열침단의 응력장

- 아래 응력 확대 계수는 무한한 판 내부에 균열이 있을 경우에만 적용

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi c}$$

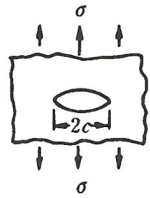
- 일반적인 경우에는 다음과 같이, 계수  $\alpha$  가 존재한다.

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

# 6.4 균열침단의 응력장

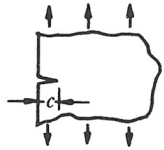
[표 6-3] 응력확대계수

(1) 무한체 내의 균열<sup>(13)</sup>



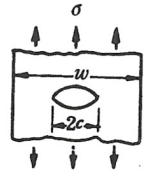
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$$

(2) 반무한체(半無限體)의 가장자리 균열<sup>(13)</sup>



$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi c}$$

(3) 유한폭의 판(板) 내의 중앙균열<sup>(13)</sup>

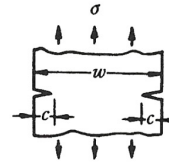


$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c} \left( \frac{w}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{w} \right)^{1/2} \quad \left( c < \frac{w}{4} \text{인 경우} \right)$$

또는

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c} \left( \sec \frac{\pi c}{w} \right)^{1/2}$$

(4) 유한폭의 판의 대칭의 가장자리 균열<sup>(13)</sup>



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c} \left[ \frac{w}{\pi c} \left( \tan \frac{\pi c}{w} + 0.1 \sin \frac{2\pi c}{w} \right) \right]^{1/2}$$

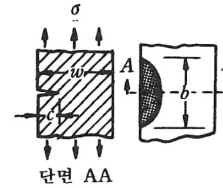
또는

$$K_I = Y \sigma \sqrt{c}$$

여기서

$$Y = 1.12 \sqrt{\pi} + 0.76 \frac{c}{w} - 8.48 \left( \frac{c}{w} \right)^2 + 27.36 \left( \frac{c}{w} \right)^3$$

(5) 유한폭의 판의 반(半)타원 표면균열<sup>(13)</sup>



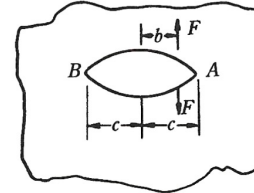
$$K_I = \left[ 1 + 0.12 \left( 1 - \frac{c}{b} \right) \right] \left( \frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{\phi_0} \right) \left( \frac{2t}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2t} \right)^{1/2}$$

$$\phi_0 = \int_0^{\pi/2} \left[ 1 - \left( \frac{b^2 - c^2}{b^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} d\theta$$

$$\phi_0 \approx \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \frac{c^2}{b^2}$$

$b \gg c$  및  $t \gg c$ 의 경우,  $K_I \approx 1.2 \sigma \sqrt{\pi c}$

(6) 균열면 췌기하중을 가진 무한체(無限體) 내의 균열<sup>(15)</sup>

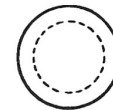
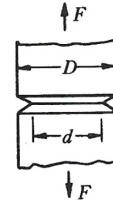


$$K_{IA} = \frac{F \sqrt{\pi c}}{2ct} \left[ \frac{2}{\pi} \left( \frac{c+b}{c-b} \right)^{1/2} \right]$$

$$K_{IB} = \frac{F \sqrt{\pi c}}{2ct} \left[ \frac{2}{\pi} \left( \frac{c-b}{c+b} \right)^{1/2} \right]$$

t : 두께

(7) 원주형(圓周形) 노치를 가진 棒<sup>(12)</sup>

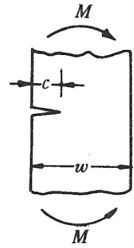


$$K_I \approx \frac{0.932 F \sqrt{\pi D}}{\pi d^2}$$

$$1.2 \leq \frac{D}{d} \leq 2.1$$

# 6.4 균열침단의 응력장

(8) 가장자리 노치를 가진 시편의 굽힘<sup>(12)</sup>



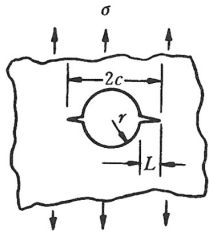
$$K_I = \frac{6Mg \left(\frac{c}{t}\right)}{(t-c)^{3/2}}$$

$c/t$	.05	.1	.2	.3	.4	.5	$\geq .6$
$g(c/t)$	.36	.49	.60	.66	.69	.72	.73

$0.1 \leq \frac{c}{t} \leq 0.6$ 의 경우

$$g\left(\frac{c}{t}\right) \approx 0.38 + 1.3\frac{c}{t} - 1.2\left(\frac{c}{t}\right)^2$$

(9) 무한체 내의 구멍으로부터 퍼지는 균열<sup>(12)</sup>

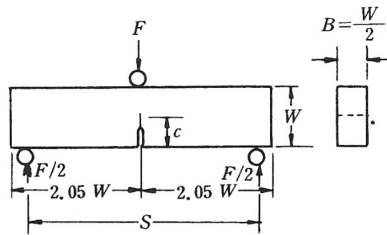


$$K_I = \sigma \sqrt{\pi L} F\left(\frac{L}{r}\right)$$

$L/r$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$F(L/r)$	2.73	2.41	1.96	1.71	1.58	1.45

$\frac{L}{r} > 0.2$ 의 경우,  $K_I \approx \sigma \sqrt{\pi(L+r)} = \sigma \sqrt{\pi c}$

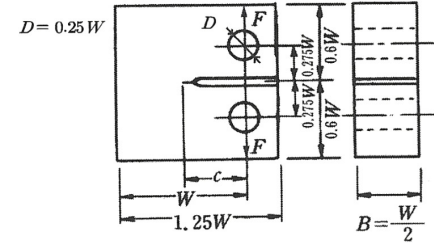
(10) ASTM 굽힘시편<sup>(14)</sup>



$$K_I = \frac{FS}{Bw^{3/2}} \frac{3\left(\frac{c}{w}\right)^{1/2} \left[ 1.99 - \frac{c}{w} \left(1 - \frac{c}{w}\right) \left( 2.15 - 3.93\frac{c}{w} + 2.7\frac{c^2}{w^2} \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{c}{w}\right) \left(1 - \frac{c}{w}\right)^{3/2}}$$

$\frac{c}{w}$ 의 전 범위에서 0.5% 이내로 정확하다.

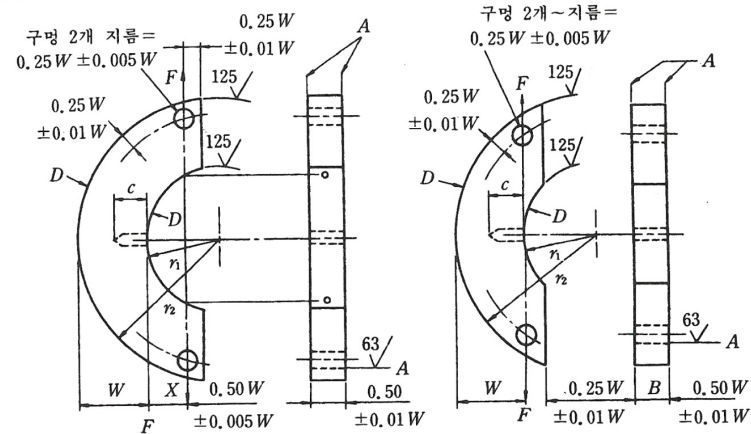
(11) ASTM 콤팩트 인장시편<sup>(14)</sup>



$$K_I = \frac{F}{Bw^{1/2}} \left(2 + \frac{c}{w}\right) \left[ 0.886 + 4.64\frac{c}{w} - 13.32\left(\frac{c}{w}\right)^2 + 14.72\left(\frac{c}{w}\right)^3 - 5.6\left(\frac{c}{w}\right)^4 \right] \left(1 - \frac{c}{w}\right)^{3/2}$$

$0.2 < c/w < 1$  범위 내에서 0.5% 이내로 정확하다.

(12) ASTM C모양 시편<sup>(14)</sup>



$$K_I = \left(\frac{F}{BW^{1/2}}\right) f(c/W) (1.9 + 1.34X/W + 1.1c/W) [1 + 0.25(1 - (c/W)^2)(1 - r_1/r_2)]$$

여기서

$$f(c/W) = [(c/W)^{1/2} / (1 - c/W)^{3/2}] [3.74 - 6.3c/W + 6.32(c/W)^2 - 2.43(c/W)^3]$$

단,  $0.45 \leq c/W \leq 0.55$ ,  $X/W = 0.0$  또는  $0.5$ ,  $0 \leq r_1/r_2 \leq 1.0$  일 때 오차  $\pm 1\%$

$0.2 \leq c/W \leq 1$ ,  $X/W = 0.0$  또는  $0.5$ ,  $0 \leq r_1/r_2 \leq 1.0$  일 때 오차  $\pm 1.5\%$

$0.2 \leq c/W \leq 1$ ,  $0 \leq X/W \leq 1$ ,  $0 \leq r_1/r_2 \leq 1.0$  일 때 오차  $\pm 3\%$

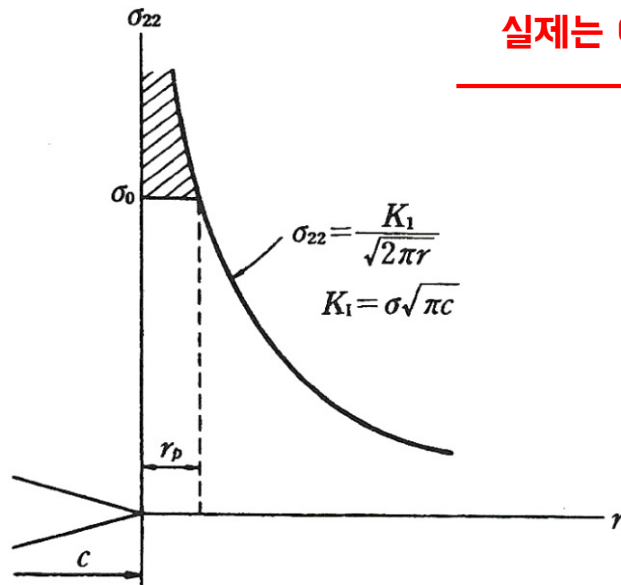


## 6.5 균열첨단의 소성역

- 균열첨단 인근의 응력에 대한 탄성해에 따르면 → 균열첨단에서는 응력이 무한대
- 실제로는 항복응력이 있어, 그 이상의 응력에서는 소성변형
- 따라서, **균열첨단 주위의 영역에서는 소성변형 → 응력이 유한한값 → 소성역 형성**
- 소성역의 크기는 평면응력 (얇은판) 인가, 평면변형 (두꺼운 시편) 에서 인가에 따라 달라짐
- 이 절에서는 **평면응력 상태의 소성역 계산 (6.6에서 평면변형상태를 계산)**
- 소성역의 크기  $r_p$

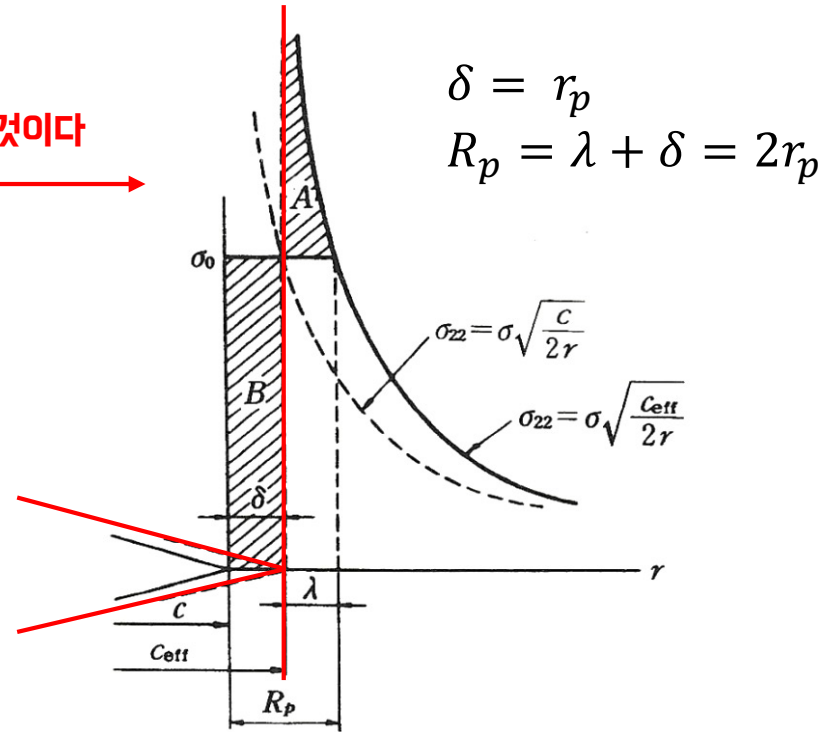
$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_0^2}$$

# 6.5 균열첨단의 소성역



[그림 6-9]  $r_p$ 의 정리  
소성역의 크기

실제는 이럴 것이다



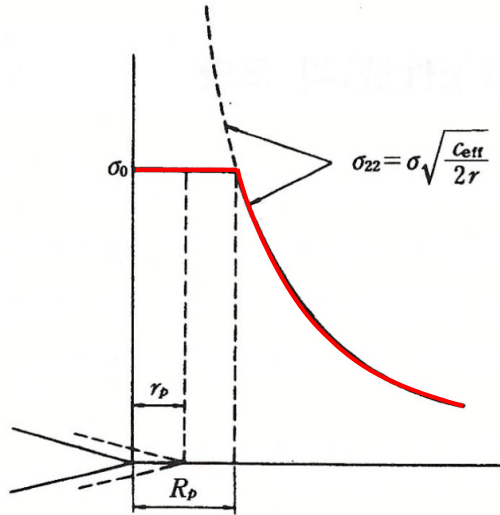
[그림 6-10] Irwin의 소성역 계산

- 실제 소성역의 크기는  $r_p$  보다 커야 한다. → 왜냐하면, 빗금친 하중을 다른 곳에서 감당해야하기 때문
- Irwin의 논리에 따르면, 소성변형이 일어나면, 균열첨단의 크기가 실제보다 큰 것 같은 성질을 가짐.



## 6.5 균열첨단의 소성역

- 소성역으로 인하여 이완된 응력분포



[그림 6-11] Irwin의 소성역으로 인한 이완된 응력분포

- 소성역의 크기를 구하려는 시도가 여러 번 있었으나, 그 결과는 Irwin의 결과와 유사

- $K_I$ 의 보정도 필요

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi c} = \alpha \sigma \sqrt{\pi \left( c + \frac{K_I^2}{2\pi \sigma_0^2} \right)}$$

## 6.6 소성역의 모양

- 앞절에서는  $x_1$ 축 방향의 소성역 크기만을 고려.
- 소성역의 모양에 대한 표현은 '항복조건'을 활용하여 구할 수 0
- 여기에서는 Von Mises 항복조건만을 고려.
- 정리하면,

### 평면변형의 경우

$$r_p = \frac{K_I^2}{4\pi\sigma_0^2} \left[ \frac{3}{2} \sin^2\theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos\theta) \right]$$

### 평면응력의 경우

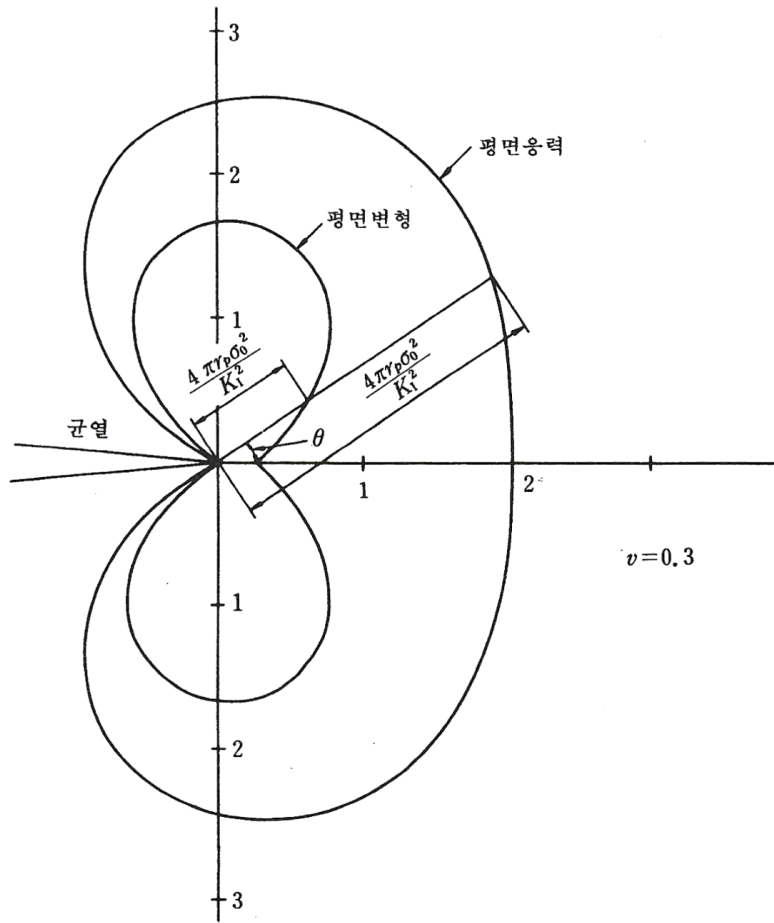
$$r_p = \frac{K_I^2}{4\pi\sigma_0^2} \left[ 1 + \frac{3}{2} \sin^2\theta + \cos\theta \right]$$

- 즉 앞 절의 식은 평면변형에 맞지 않음
- 이 절의  $r_p$  는 응력이완효과를 고려하지 않은 값
- 완벽한 이론 연구가 아직 없다.

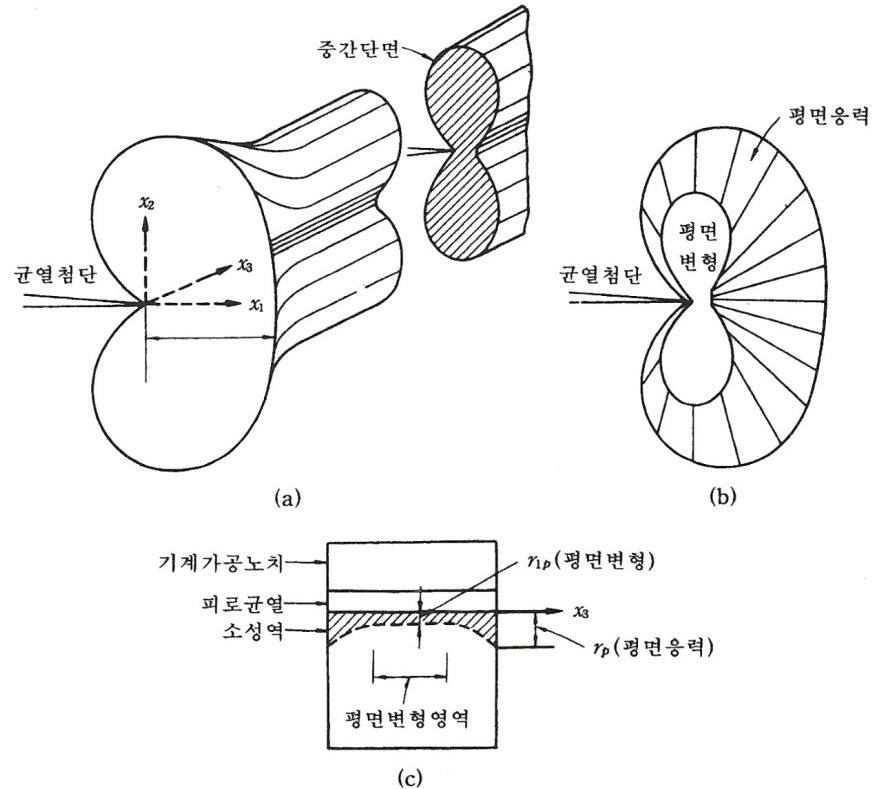
- $\theta$ 가 0이면, 앞 절의 식과 동일
- 평면변형 소성역 = 1/6 \* 평면응력 소성역 ( $\theta = 0, \nu = 0.3$  일때)



# 6.6 소성역의 모양



[그림 6-12] 소성역 모양( $\nu = 0.3$ 일 경우)



(a) 입체도 (b)  $x_1, x_2$ 에 평행한 단면도 (c) 균열면

[그림 6-13] 소성역의 입체도(방식 I 변형)

- 표면에서는 항상 평면응력상태
- 내부에 평면변형상태가 있으려면, 두께가 매우 두꺼워야 한다.



## 6.8 평면변형파괴인성

- 앞절(6.4)에서 균열의 모양, 크기가 다르고, 작용응력이 달라도 → **응력확대계수 ( $K_I$ )** 가 같으면 균열 첨단 인근의 응력장이 같다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$$

- 만일, 균열 첨단에 소성역이 생성 → 균열의  $K_I$  이 동일 → 소성역의 크기도 동일 → 소성역 밖의 탄성응력장도 동일

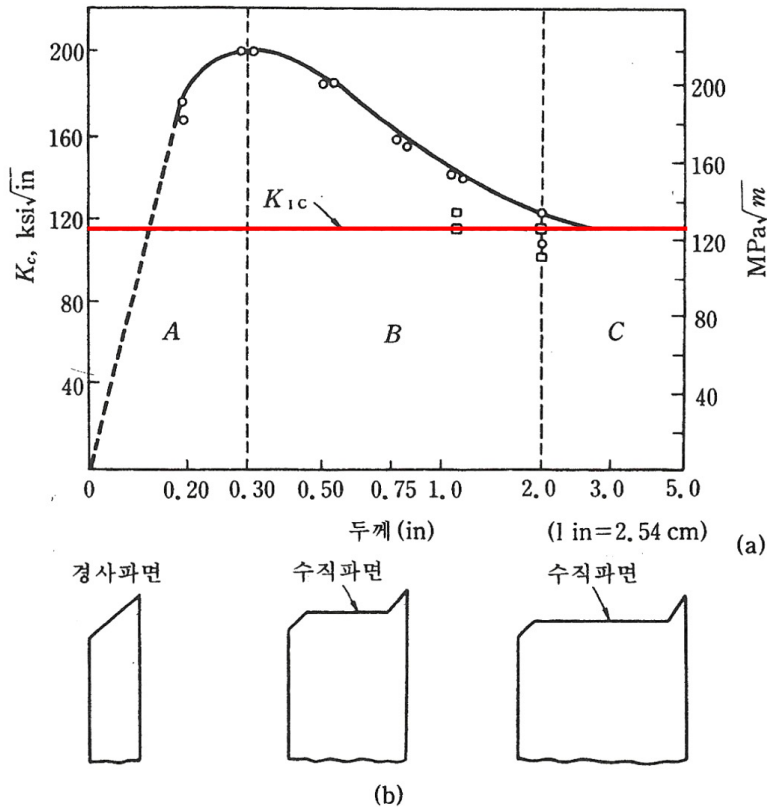
$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_0^2}$$

- 즉, 소성역이 있을 때도 **응력확대계수**가 균열첨단 인근의 (소성역을 포함한) **응력과 변형을 결정**하는 척도

- 균열첨단에서 응력과 변형이 임계값에 이르면 균열확장!
- 이때의 임계값 : **임계응력확대계수 ( $K_{IC}$ )**
- 임계응력확대계수는 시편의 두께에 따라 변한다. (**얇을때: 평면응력상태가 지배적, 두꺼울때: 평면변형상태가 지배적**)



# 6.8 평면변형파괴인성



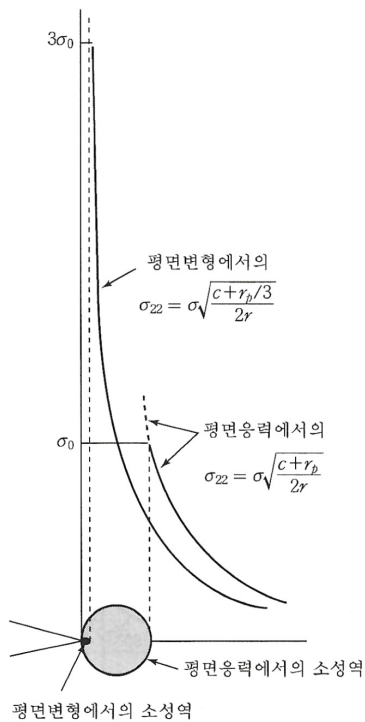
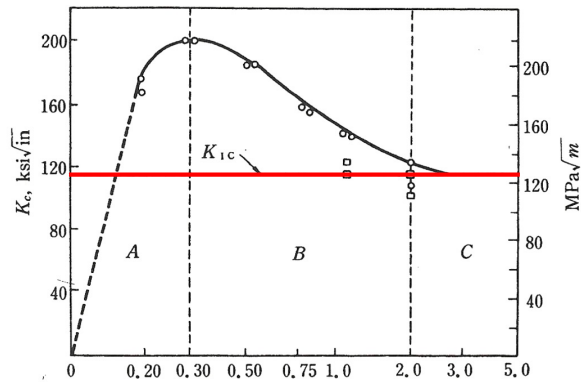
(a) maraging 강에 대한 실험결과<sup>(31)</sup>

(b) 시편의 파괴면의 모양과 두께와의 관계

[그림 6-17] 판의 두께에 따른 파괴인성의 변화

- 평면변형상태(두꺼운, C 영역)에서는  $K_c$  는 두께와 무관한 일정한 값  
 = 평면변형파괴인성 ( $K_{Ic}$ )  
 = 항복강도 같은 재료의 상수
- 판의 두께 변화에 따른 파괴인성의 변화에 대한 몇가지 모델이 있지만, 완벽하지 않다.

# 6.8 평면변형파괴인성



[그림 6-18] 평면응력과 평면변형에서의 균열첨단 인근의  $\sigma_{22}$  분포

- **시편이 두껍다. (평면변형상태)**
  - 균열 첨단에서의 응력이 크다.
  - 파괴응력이 낮아지고, 임계응력확대계수도 작을 것

$$K_C = \sigma_f \sqrt{\pi c}$$

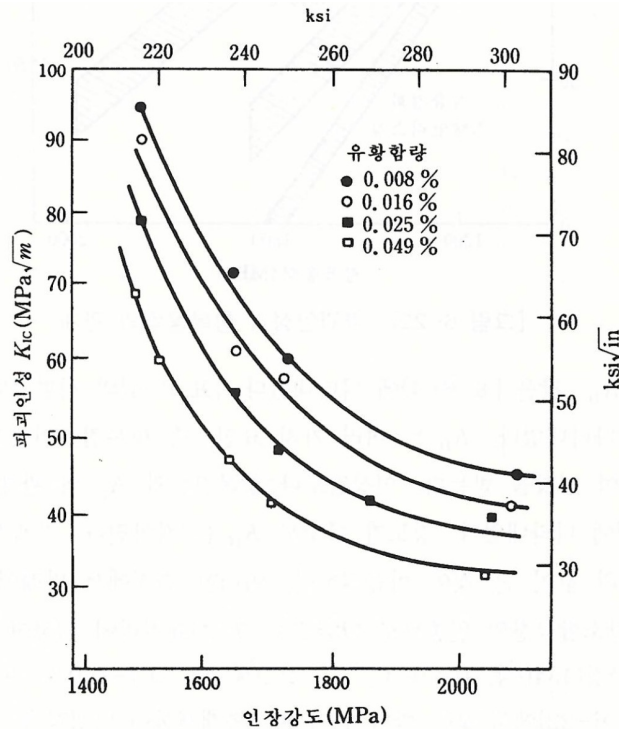
- **시편이 얇다. (평면응력 >> 평면변형)**
  - 균열 첨단에서의 응력이 작고 (상대적으로)
  - 파괴응력이 증가, 임계응력확대계수도 커짐.

- **시편이 매우 얇다. (완전 평면응력 상태)**
  - 소성역의 크기가 시편의 두께보다 커지면
  - 낮은 응력에서도 변형 → 파괴

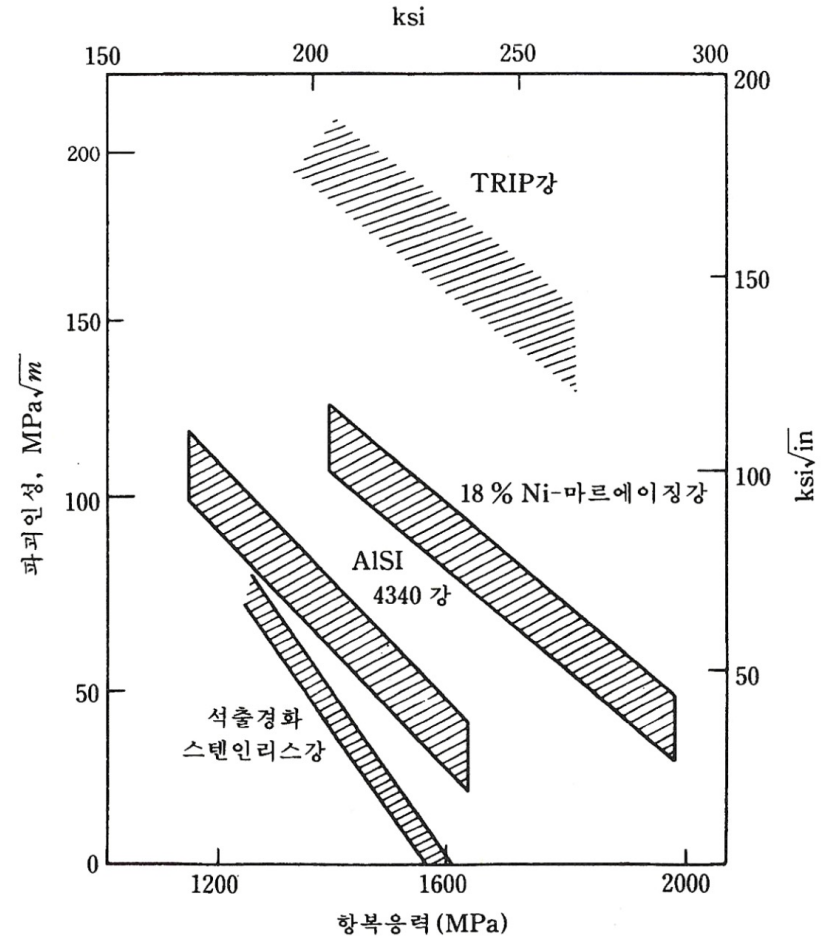
- 일반적으로 소성역의 크기 = 시편의 두께:  $K_C$  최대



# 6.8 평면변형파괴인성



[그림 6-22] 0.45C-Ni-Cr-Mo강의 인장강도와 황(S)함량이  $K_{IC}$  에 미치는 영향<sup>(44)</sup>



[그림 6-23] 파괴인성과 항복응력의 관계

- 평면변형파괴인성( $K_{IC}$ ) 는 여러가지 요인, 항복점, 인장강도, 온도, 변형속도에 영향
- 강도 (인장강도, 항복강도) 가 클수록  $K_{IC}$  는 작아진다.
- 기계적 특성이 좋으려면 강도와  $K_{IC}$  모두 좋아야 한다.



## 6.9 파괴인성, 설계응력, 균열크기의 상호작용

- 파괴인성, 설계응력, 균열크기의 상호작용이 부품의 파괴조건을 제어
- 균열을 가진 부품의 파괴조건은 다음과 같이,

$$K_I = K_C = \alpha\sigma\sqrt{\pi c}$$

- 평면변형조건에서 파괴가 일어난다면  $K_C$  대신  $K_{IC}$
- 위의 식은 부품의 파괴가 일어나지 않도록 설계 하는데 사용될 수 있다.

- **재료가 선정되면  $K_C$  는 알 수 있고,**
- **쉽게 찾아서 수선 가능한 크고 안전한 균열  $c$  를 알 수 있다면,**
- **파괴가 일어나지 않을  $\sigma$  설계응력을 알 수 있다.**

$$\sigma < K_C / (\alpha\sqrt{\pi c})$$

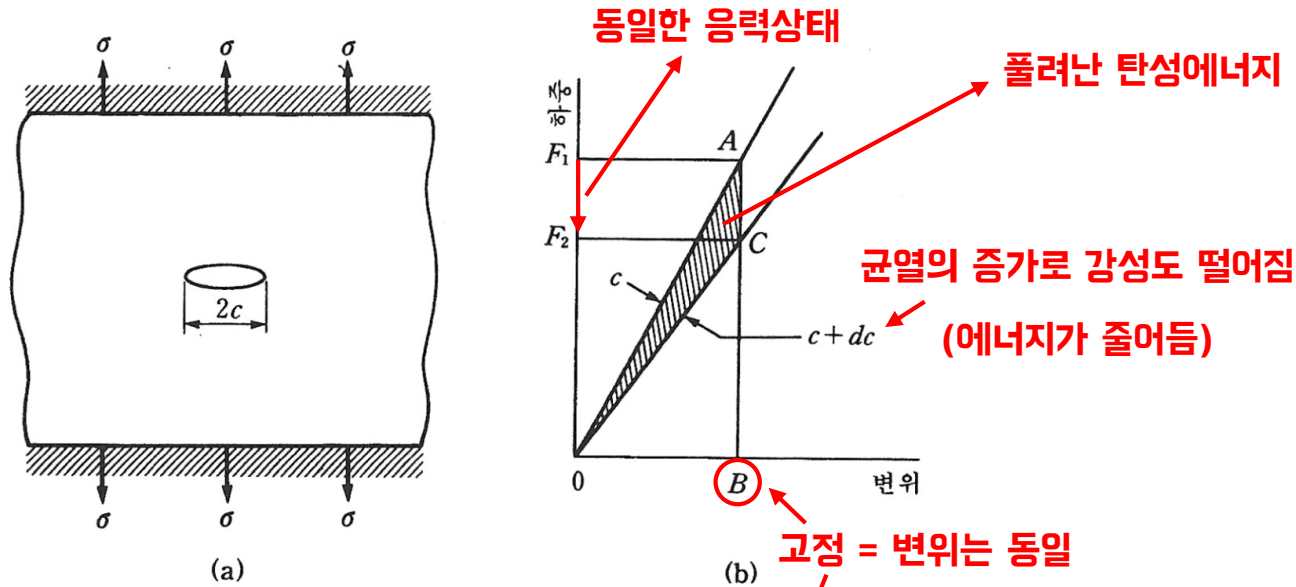




# 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

- 6.2절에서 이론응집력과 취성재료의 파괴강도 사이의 큰 차이

→ Griffith 가 처음으로 설명



[그림 6-25] (a) 균열을 가진 판이 인장된 후 끝이 고정된 상태  
 (b) 균열  $c$ 가  $c+dc$ 로 성장할 때 풀리는 탄성에너지(OAC)

- 균열이 성장할 때 풀리는 에너지( $U_e$ )가 균열성장에 필요한 모든 에너지( $U_r$ )를 공급하기에 충분하다면, 균열이 성장할 것이다. → 라고 Griffith 제안.
- 만일 충분하지 않다면, 응력을 증가 시켜야한다. (풀리는 에너지를 늘리기 위해서)



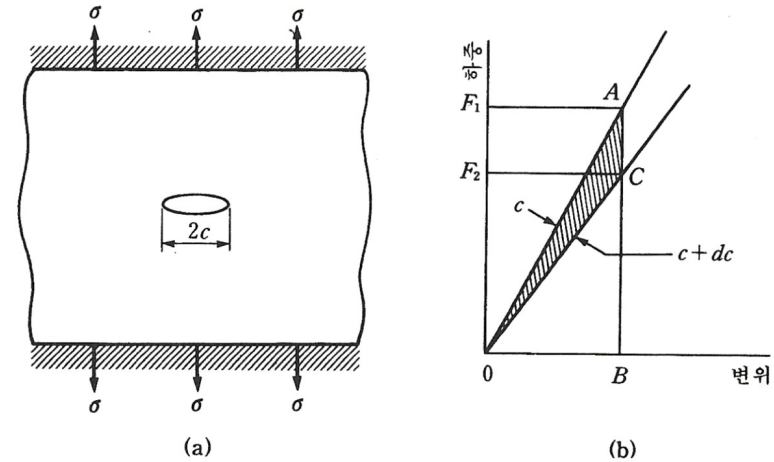
# 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

- $\sigma$ 의 1축 인장응력상태, 두께  $B$ , 무한히 큰판
- 양끝은 고정,  $2c$ 의 균열,
- 이때의 탄성에너지 감소량의 근사값을 계산해보면,
- $2c$ 의 균열이 생기면서, 반지름  $c$  원 안의 재료에는
- 탄성에너지가 없다고 가정, 부피는  $\pi c^2 B$
- $2c$ 의 균열 형성으로 인해 풀리는 에너지는 (근사식)

$$U'_e = \frac{\pi c^2 B \sigma^2}{E} \quad \leftarrow \quad U_0 = \frac{2\sigma^2}{2E}$$

- **한쪽의** 탄성에너지는 절반

$$U_e = \frac{\pi c^2 B \sigma^2}{2E}$$



[그림 6-25] (a) 균열을 가진 판이 인장된 후 끝이 고정된 상태  
(b) 균열  $c$ 가  $c+dc$ 로 성장할 때 풀리는 탄성에너지(OAC)

- $dc$  만큼 균열이 성장하면 에너지 변화는

$$\frac{\partial U_e}{\partial c} = \frac{\pi c B \sigma^2}{E}$$

- 일반적으로 다음과 같이 표현

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial U_e}{\partial c} = \frac{\pi c \sigma^2}{E}$$



## 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

- $G$  = 탄성에너지 해방도 (elastic energy release rate)  
= 균열 구동력 (crack driving force)

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial U_e}{\partial c} = \frac{\pi c \sigma^2}{E}$$

- 단위: 단위면적당 에너지 ( $J/m^2$ ) or 단위길이당 힘 ( $N/m$ )
- 즉, 균열을 단위면적만큼 성장시킴으로 풀려나는 에너지 또는 균열을 단위길이 만큼 성장시키려는 힘으로 해석

- 균열 단위면적을 성장시키는데 소비되는 에너지 (또는 균열저항)  $R = \frac{1}{B} \frac{\partial U_r}{\partial c}$

- 즉,

$$G = G_c = R$$

- 일때 균열이 성장  $G_c$  는 임계값. → 이때 파괴가 된다.
- Griffith 는  $U_r$  에서 균열의 표면에너지 ( $U_s$ )만을 고려.  $U_s = 2cB\gamma_s$

$$R = 2\gamma_s \longrightarrow \text{단위면적당 표면에너지}$$



## 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial U_e}{\partial c} = \frac{\pi c \sigma^2}{E} \rightarrow G_c = \frac{\pi c \sigma_f^2}{E} \rightarrow \text{파괴응력}$$

$$R = 2\gamma_s \rightarrow \sigma_f = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi c} \right)^{1/2} \rightarrow \text{단위면적당 표면에너지}$$

: 파괴에 대한 Griffith 조건

→ 유리의 파괴강도가 이론응집력보다 작은 이유는 미세한 균열 때문

→ 유리와 같은 완전한 취성재료의 파괴강도를 만족스럽게 설명

## 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

- 완전한 취성재료를 제외한 대부분의 재료에 Griffith 이론이 적용될 수 없는 것은 파괴에 소요되는 에너지로 **표면에너지** 뿐 아니라 균열 첨단에서의 **소성변형에너지**가 필요하기 때문.
- **금속은 소성변형에너지가 훨씬 크기 때문에 표면에너지는 무시 가능**

$$G = \frac{K^2}{E} \rightarrow G_I = \frac{K_I^2}{(1 - \nu^2)E} \rightarrow G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{(1 - \nu^2)E}$$

↑
↑

평면변형조건
임계값

- $G_{IC}$  는 평면변형에서의 임계변형에너지 해방도 (critical strain energy release rate)
- $K_{IC}$  는 평면변형파괴인성

## 6.10 취성파괴에 대한 Griffith 이론과 파괴인성

- 앞선 내용으로 취성 물질에서 표면에너지가 파괴강도에 영향을 준다는 것을 확인

→ 시편의 표면에 염화메틸을 뿌리거나

→ 바위에 구멍을 뚫을 때 표면활성제

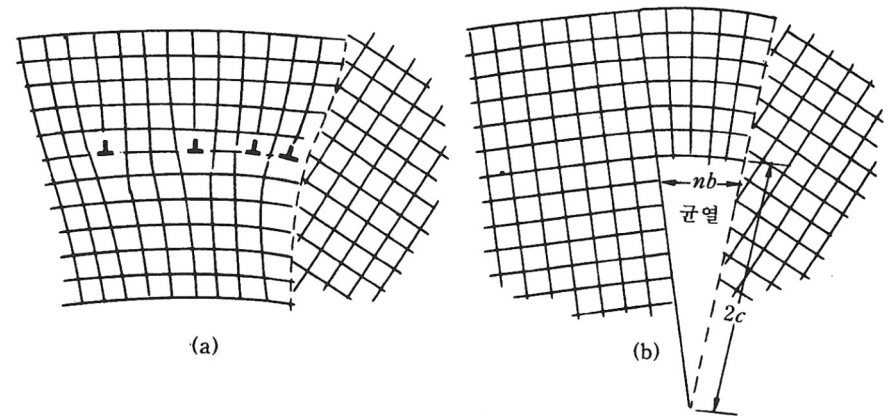
이와 같이 취성고체의 파괴가 표면조건에 따라 민감하게 변하는 현상을 **Joffe 효과**.

# 6.11 금속에서의 균열의 발생 및 취성파괴

- 6.10절에서의 파괴이론은 재료 속에 **Griffith 균열이 이미 존재한다는 것에 바탕**
- 하지만, **응력을 받고 있지 않는 금속 내부에 Griffith 균열이 존재한다는 실험적 증거 X**
- 취성벽개파괴 (입내파괴) 를 일으키는 균열은 처음에 존재하는게 X, 변형으로 생성
- 적당한 온도에서 상당량의 미소균열이 존재
- 즉, 균열의 발생조건은 균열의 전파조건과 반드시 같지는 않음

- **벽개파괴 과정**

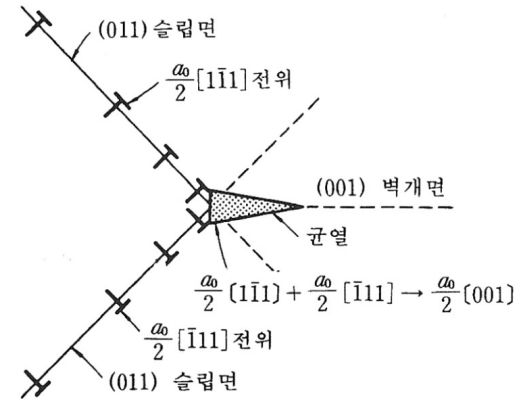
1. 소성변형으로 장애물에 전위 집적
2. 전위집적의 맨 앞에서 전단응력의 집중  
→ 미소균열 (Zener가 제창)
3. 균열의 전파



[그림 6-26] 전위집적의 앞에서 전위가 합쳐져서 생긴 미소균열

# 6.11 금속에서의 균열의 발생 및 취성파괴

- Cottrell 은 ‘체심입방체(BCC)의 균열발생’에 대한 또 다른 전위 집적기구를 제안
- 2개의 교차하는 슬립면에 전위가 집적
- 부동전위를 형성
- 뒤따르는 전위활주의 장애물
- 전위집중 → 벽개면에 파괴



[그림 6-31] bcc 결정이 [001] 방향으로 인장을 받을 때 2슬립면의 교차선에서 발생하는 미소균열

→ 하지만 Stroh의 계산에 의하면,

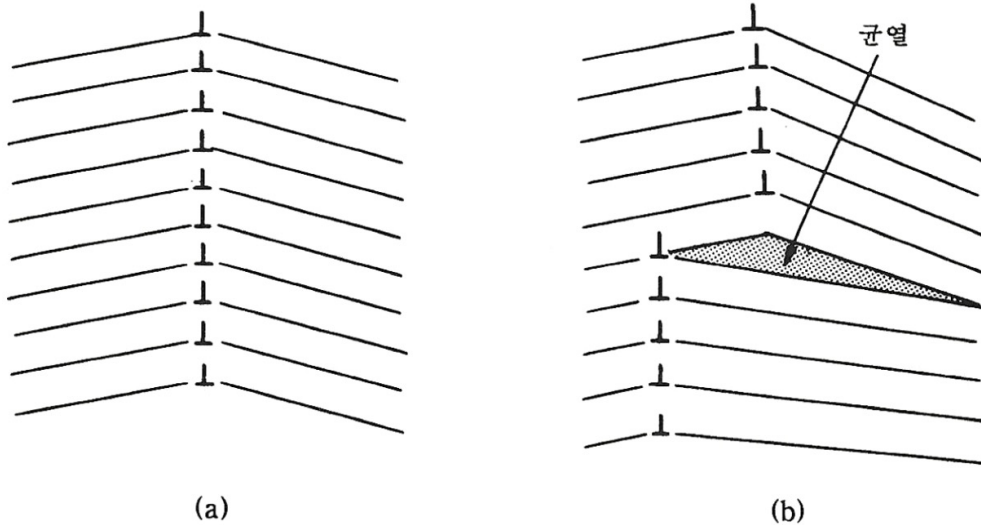
응력장이 균열을 일으킬 만큼 충분히 커지기 전에, 부동전위가 전위집적의 힘을 받고 분해

→ 그러므로, Cottrell 의 기구는 중요한 역할을 하지 않을 것으로 예측.

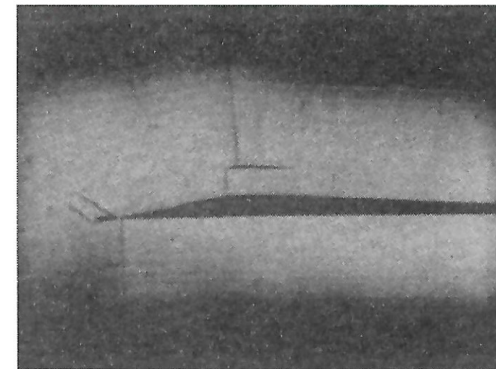


# 6.11 금속에서의 균열의 발생 및 취성파괴

- ‘경각입계가 전단’을 받으면 큰 응력집중이 가능.
- 이 국부수직응력이 이론응집력에 이르고, 응력집중이 거리에 따라 급속히 줄지 않는다면
- 아래와 같은 균열이 가능
  - 불균질 변형된 HCP 혹은 MgO 같은 이온화합물에서 보편적
  - Stroh 는 이러한 기구를 고려하여 아연결정의 인장강도의 방위의존성을 계산하였는데, 실험결과와 잘 일치



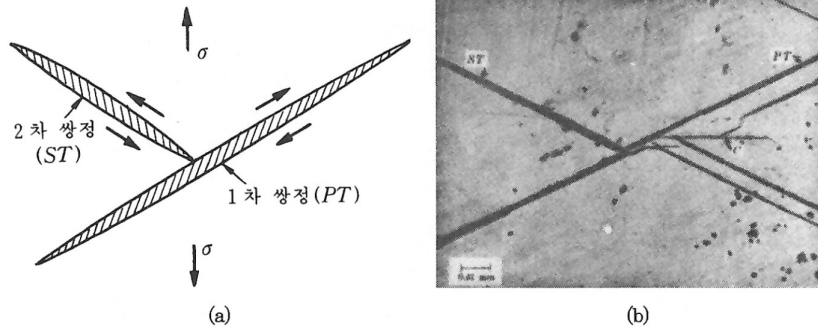
[그림 6-32] 경각입계의 전단에 의한 균열의 발생



[그림 6-33] 아연 단결정의 벽개파괴(약 10배 확대된 사진<sup>(56)</sup>)

# 6.11 금속에서의 균열의 발생 및 취성파괴

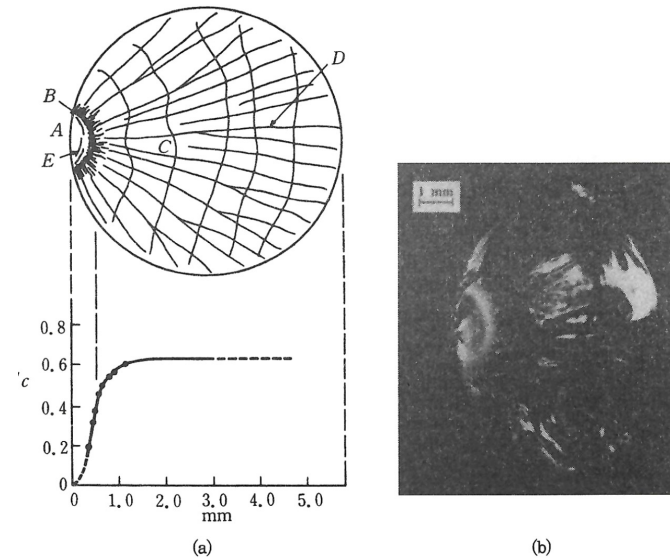
- 쌍정에 의한 균열



[그림 6-34] (a) 2개의 변형쌍정의 교차로 생기는 균열, (b) Si 철에서 관찰된 예  
PT: 1차쌍정, ST: 2차쌍정, C: 교차로 생긴 균열<sup>(58)</sup>

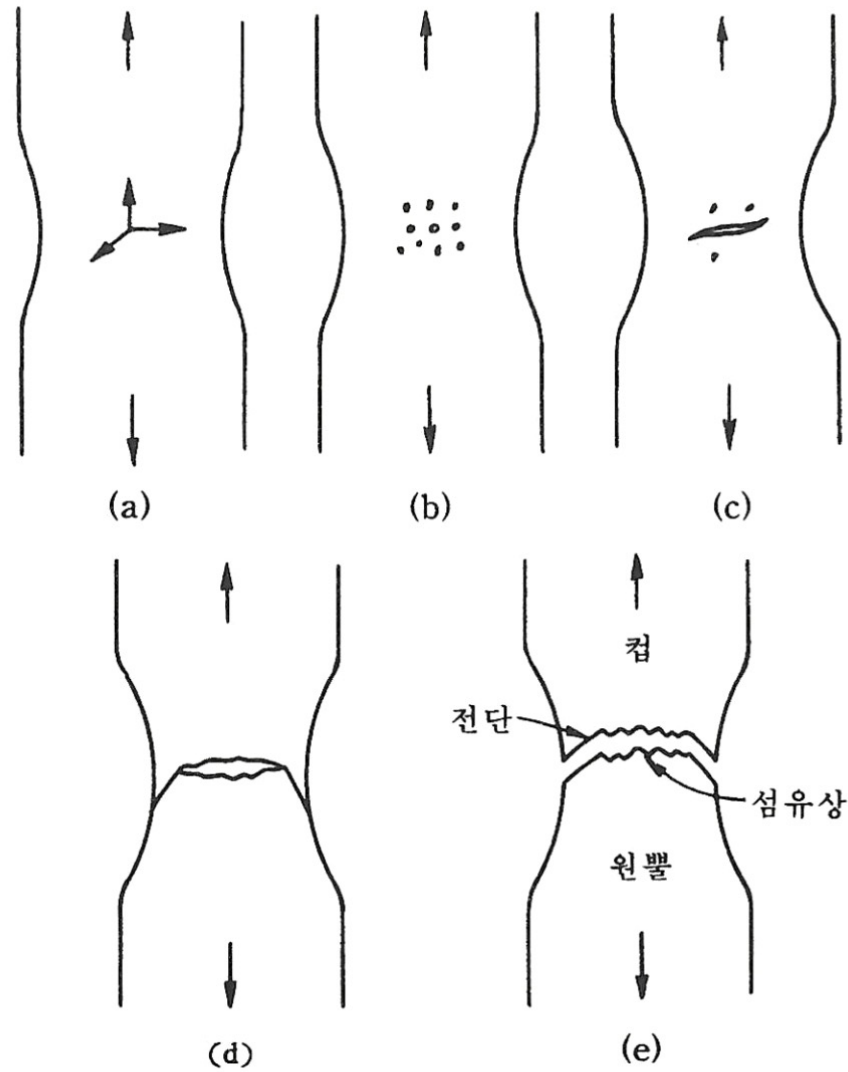
- 벽개파괴 vs 연성파괴는 단면을 통해 판단

→ River pattern



[그림 6-36] (a) 파면의 무늬와 균열의 전파속도와의 관계  
(b) 파면의 실제 사진<sup>(60)</sup>

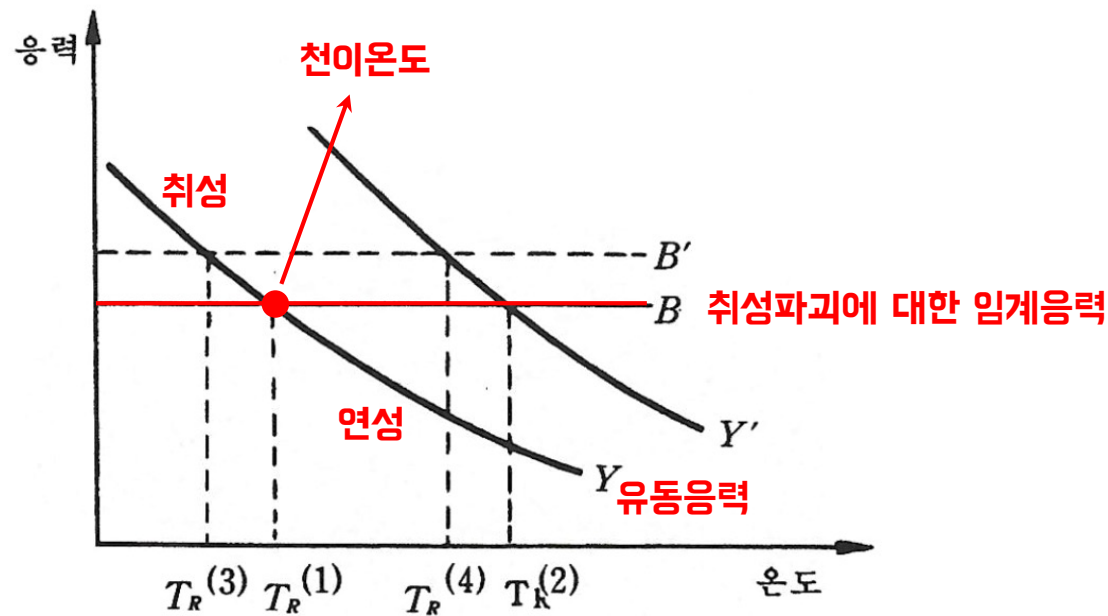
# 6.12 연성파괴



[그림 6-48] 컵-원뿔형 파괴의 단계<sup>(76)</sup>

## 6.13 연성-취성 파괴전이(또는 전이)

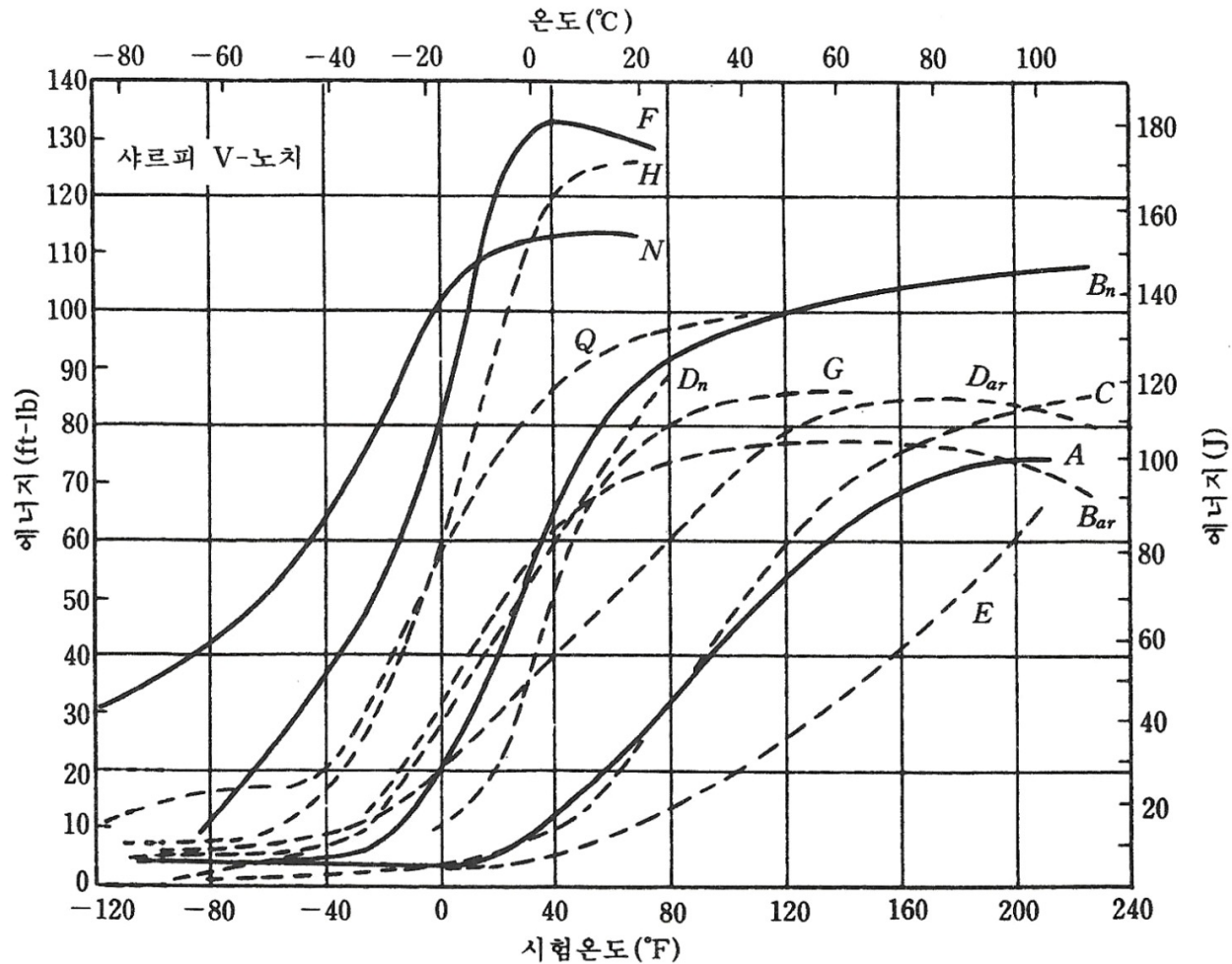
- 저 탄소강 같은 BCC 중에는 고온이나 저변형속도에서 연성을 나타내고
- 저온이나 고변형속도에서 취성을 나타낸다.
- 이러한 전이거동을 이해하는 것은 매우 중요
- 불순물, 제2상입자, 냉간가공 → 새로운 항복응력의 곡선  $Y'$  (천이온도 상승)
- 결정립계의 크기가 미세 → 파괴강도가 증가  $B'$  (항복응력의 변화는 미미)



[그림 6-50] 연성-취성 천이에 대한 Davidenkov의 그림

## 6.13 연성-취성 파괴전이(또는 전이)

- 온도가 낮으면 → 더욱 취성 → 인성이 떨어진다. → 에너지가 줄어든다



[그림 6-51] 강(鋼)의 샤르피 충격시험으로 얻은 에너지-온도곡선<sup>(78)</sup>