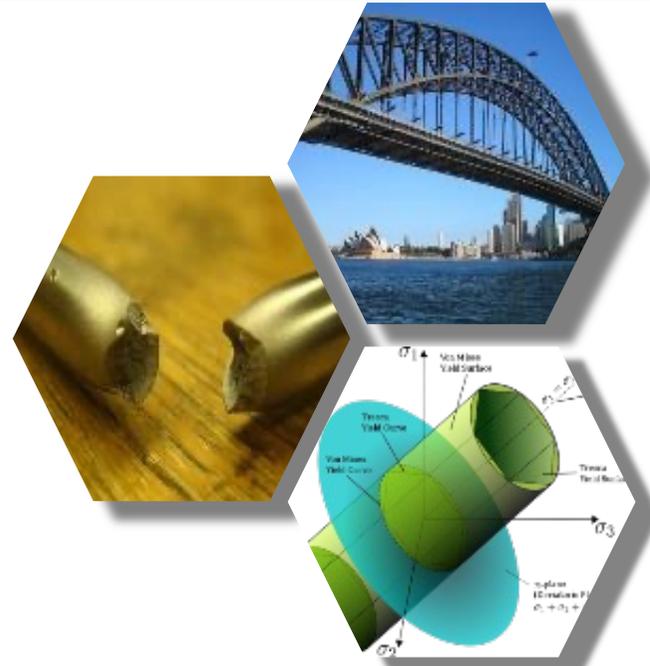


제8장 파괴역학



Chapter 6. 요약

Tresca 항복조건

최대 전단응력이 특정한 값을 초과하면 항복이 일어난다고 판단

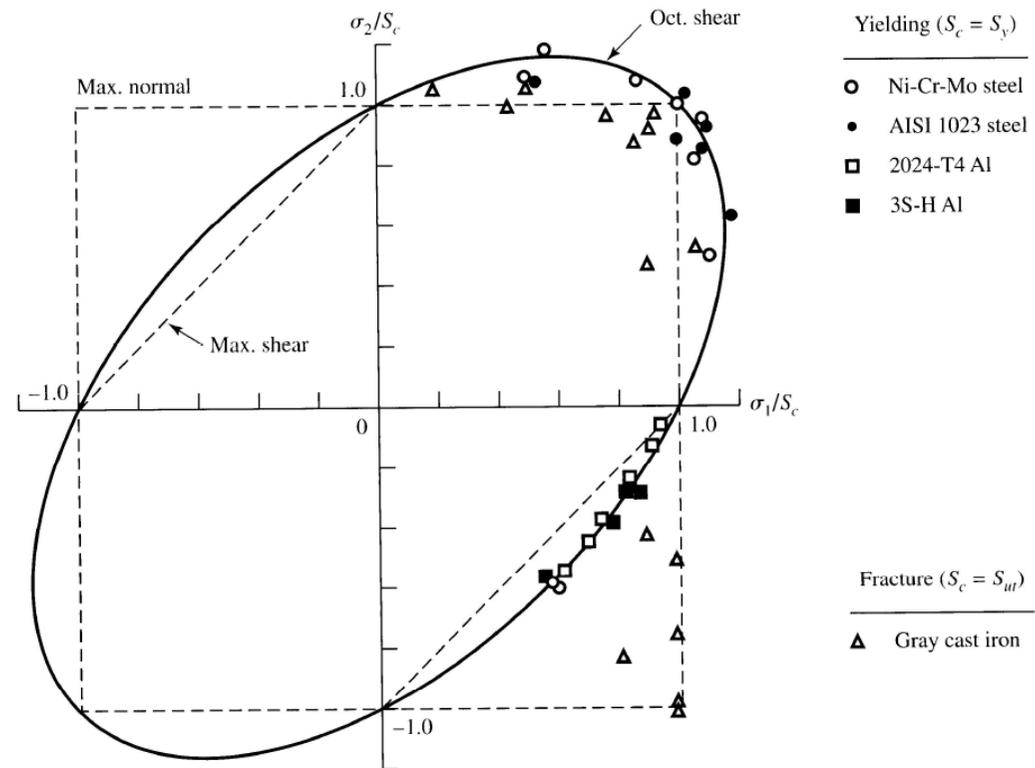
$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_Y \quad FS = \frac{\sigma_Y}{|\sigma_1 - \sigma_3|}$$

von Mises 항복조건

소재의 최대 전단 에너지량이 1축 인장에서 최대 전단 에너지와 같을 때 항복이 일어난다는 가정에서 출발

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = \sigma_Y$$

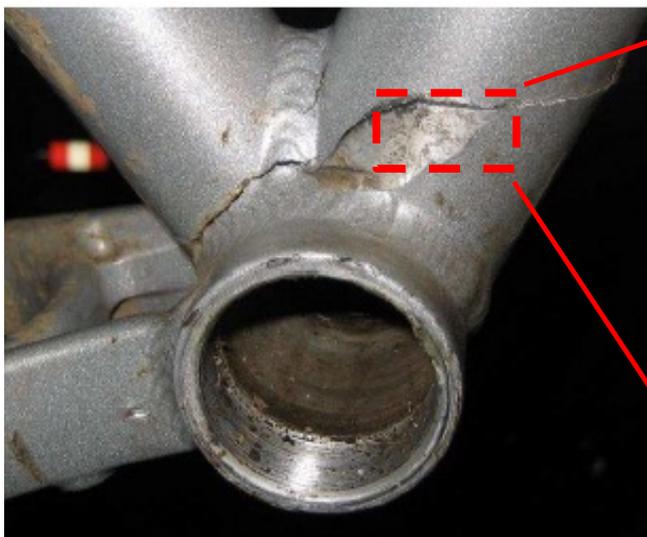
$$FS = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}}$$



재료의 파괴

■ 파괴역학의 태동

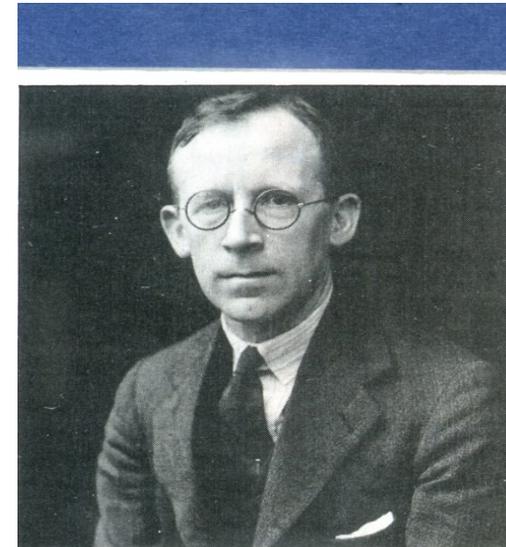
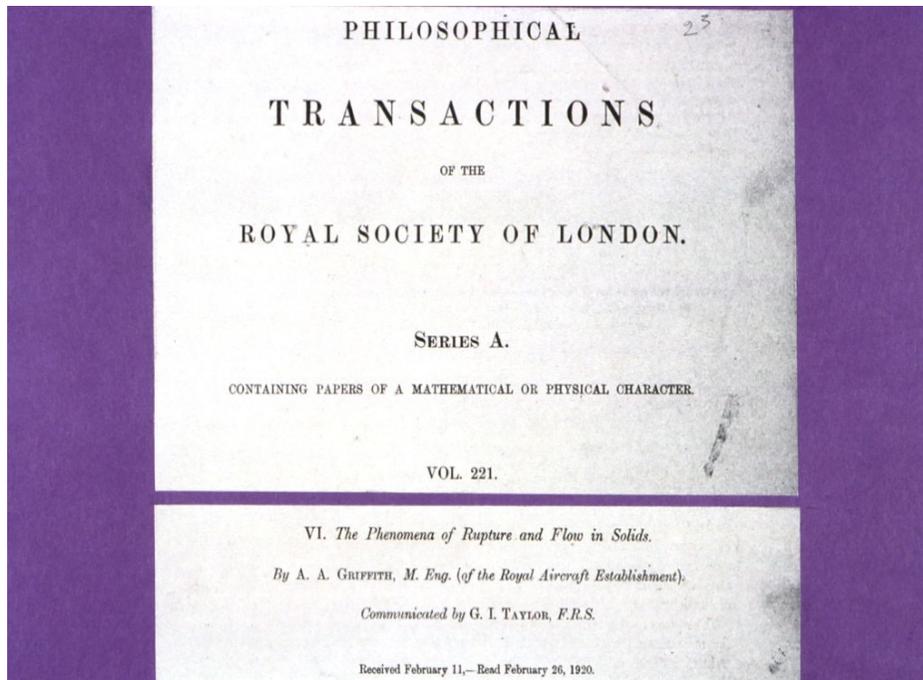
- 현저하게 낮은 하중 또는 응력하에서 물체가 파손되는 이유 ?
- 파괴(fracture)는 재료가 두 조각 이상으로 파손되는 것 → 이러한 현상을 이해하고 설계상의 결함을 보완하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔음.
- 실제 파괴 실험 결과와 비교하면 실제 재료는 이론적으로 추정된 재료의 강도보다 낮게 평가됨
- 그 이유는 실제 재료에는 이상적인 재료와는 달리 수많은 결함들이 존재하기 때문임.
- 재료의 파괴를 역학적인 관점에서 다루는 학문을 파괴역학(fracture mechanics) 이라고 하며 **파괴역학의 기본 출발점은 모든 재료 내에는 균열이 있다고 가정**
- 파괴 역학에서는 외부의 여러 조건(응력, 높은온도 등)에 의하여 균열의 크기가 증대되고 균열의 성장 속도가 가속되다 결국 파괴에 이른다고 설명



파괴역학의 태동

■ Alan A. Griffith

- 취성재료를 사용한 실험에서 **실제 재료의 파괴강도 << 이론적으로 계산 확인**
- 파괴현상이 **시편의 크기에 영향을 받고 있음**을 지적
- 이론과 실제의 파괴강도의 차이는 **결합의 포함 유무에 달려있다는 추론**을 제시
- 재료내부의 결함을 확대하는데 필요한 표면 에너지를 열역학 법칙의 토대 하에 균열의 성장과 연계 시켜서 파괴에 대한 기본적인 이론을 확립



A A Griffith in 1937 (Courtesy of DRA)

파괴역학의 태동

■ George R. Irwin

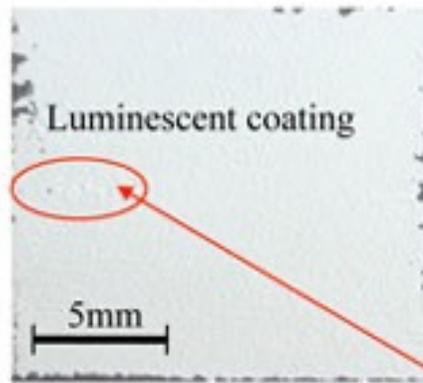
- 2차대전 중 미국은 영국에 대한 지원을 위해서 역사상 유례가 없을 정도의 대규모 선단을 구성하였다.
- 대형선박에 대한 안전성을 연구하고 있던 미국 해군연구소의 Irwin은 **재료내에 저장되어 있던 변형률 에너지가 균열을 성장시키게 한다는 개념을 제시함.**
- 소성일과 표면에너지를 포함하는 균열 성장 과정에서의 소산되는 에너지가 파괴에 대한 저항의 크기를 가늠하게 한다는 제안을 함.
- 파괴시에 필요한 에너지를 계산할 수 있는 길을 열어줌으로써 파괴역학의 기초를 확립하는데 큰 공헌을 하였음.
- 이런 파괴역학의 개념은 aircraft, nuclear reactor vessels 등 여러 파괴에 민감한 제품들의 개발에 적용되고 있음.



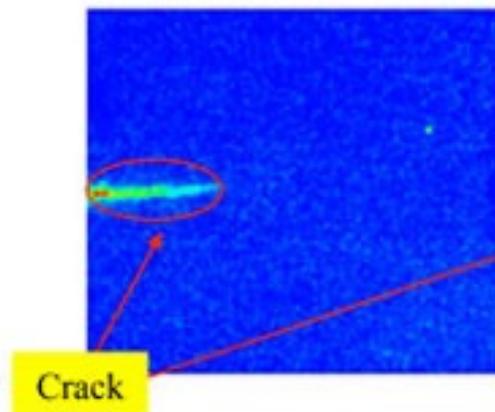
응력집중

■ 응력집중

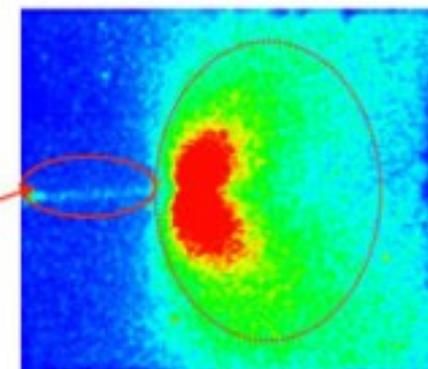
- 부품의 내부의 한 지점에 균열이 존재하면 균열 양 끝 단으로 응력이 집중됨.
- 응력이 집중되어 재료의 강도를 넘어서게 되면 그 부분에서 파손이 발생함.
- 응력이 집중되는 지점의 가장 흔한 예는 다양한 부품에서 볼트나 리벳을 위한 구멍(hole) 또는 노치(notch)가 있는 부분임.



(A) Photo image of the metal plate coated with elasto-luminescent film



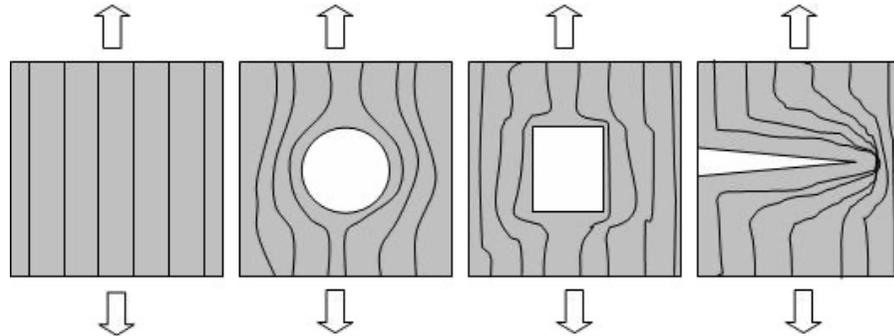
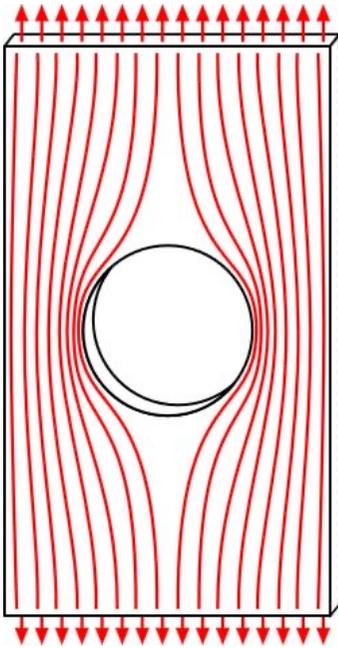
(B) Elasto-luminescent image under the application of a small load (20N)



(C) Luminescence image under the application of a large load (12kN)

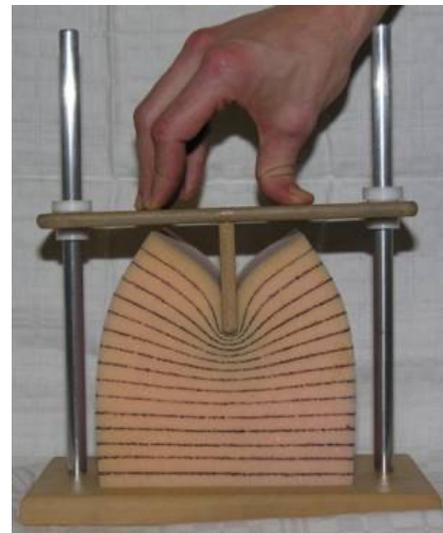
응력집중의 예시

- 응력의 흐름은 구멍같은 불연속적인 부분을 만나게 되면 그 주위를 우회해서 지나가려 한다
→ 응력선 (가상)의 간격이 좁아지게 되어 응력집중이 일어난다.

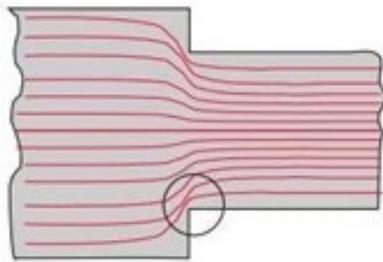


Effect of geometric discontinuities on stress distribution. Photo Credit: teachengineering.org

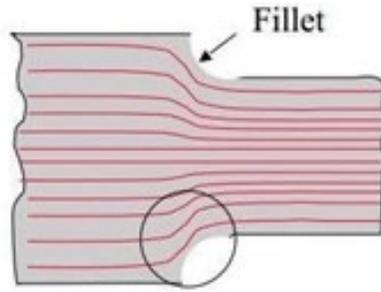
Effect of geometric discontinuity on stress distribution. Photo Credit: Wikipedia.org



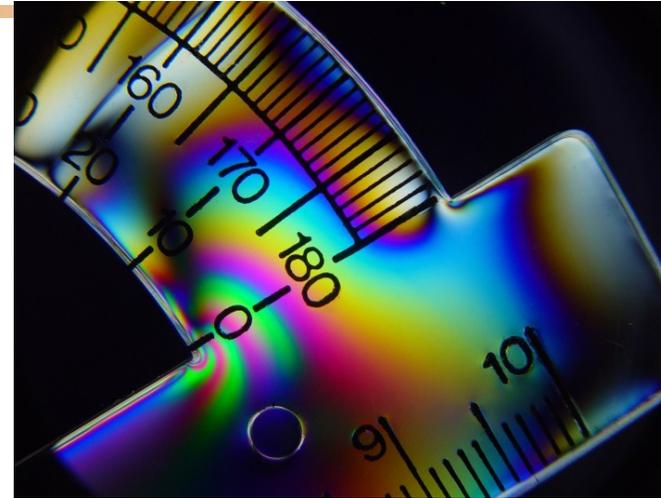
응력집중의 예시



Abrupt change
Stress "flow lines" crowd
High stress concentration

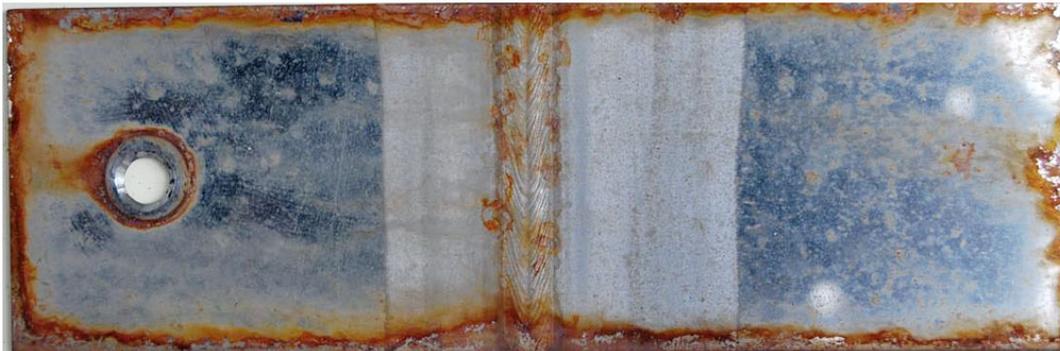


Smoother change
"Flow lines" less crowded
Lower stress concentration



Effect of rounding sharp corners using "fillets" on stress concentration. Photo Credit: corrosionpedia.com

Stress concentration at a sharp corner in a plastic protractor (Photoelastic visualization). Photo Credit: Wikipedia.org



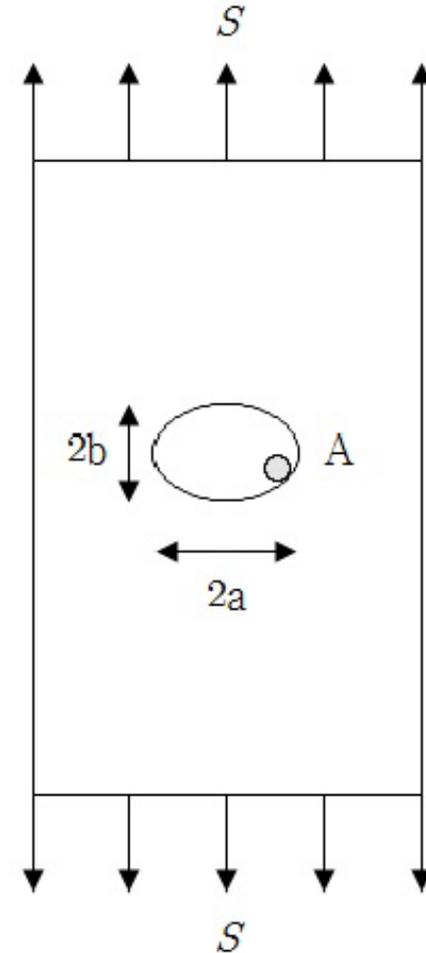
응력집중계수 (stress concentration factor)

- Inglis에 의하면 균일한 응력 S 가 작용하고 있는 무한 평판에 장축의 길이가 $2a$ 이며 단축의 길이가 $2b$ 인 타원형 균열이 그림에서와 같이 존재하면 그 끝부분에서의 응력 σ 는 다음 과같이 주어진다.

$$\sigma = S\left(1 + \frac{2a}{b}\right)$$

- 위의 식으로 부터 응력집중계수(stress concentration factor) K_t 를 다음과 같이 정의한다.

$$K_t = \frac{\sigma}{S} = 1 + \frac{2a}{b}$$



응력집중계수 (stress concentration factor)

■ 세 가지 종류의 응력집중 $K_t = \frac{\sigma}{S} = 1 + \frac{2a}{b}$

- 균열이 하중의 방향과 평행한 경우 ($a/b \rightarrow 0$ 인 경우)
 $\rightarrow K_t \rightarrow 1$ 이고 이 경우에는 응력집중이 발생하지 않음

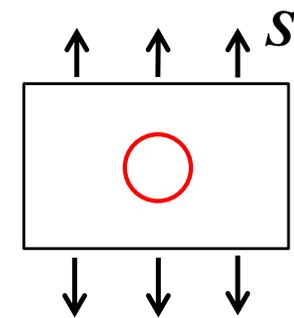
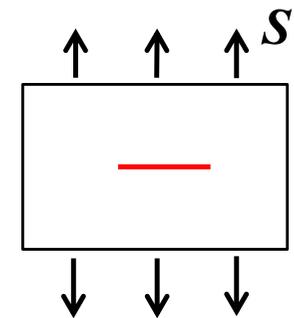
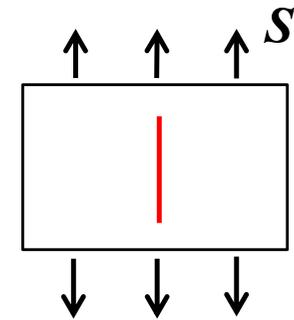
- 균열이 하중의 방향과 수직인 경우 ($a/b \rightarrow \infty$)
 $\rightarrow K_t \rightarrow \infty$. 즉, 균열의 끝에서의 응력이 무한대가 됨.

그러나 실제 재료에서는 무한대의 응력이 발생될 수 없으므로 항복점을 넘어서는 부분에 대해서는 국소적인 소성변형을 발생시키는 것으로 이해

- 완전 원형 균열의 경우로서 ($a/b = 1$)

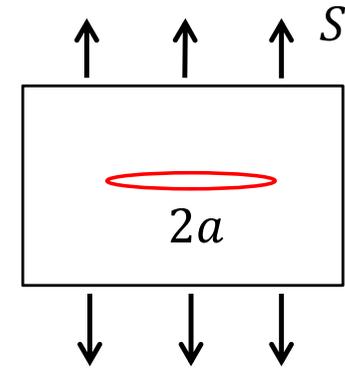
\rightarrow 응력집중계수는 $K_t = 3$. 원형의 균열의 끝에서는 원점에서

응력의 3배가 작용하게 됨. 볼트나 너트 구멍 주위에서 균열 발생이 용이.



타원형 균열 (단축이 매우 작은)에서 응력집중계수

- 타원형 균열에서 단축 방향의 길이를 아주 작게 만들면 길이가 $2a$ 인 직선 형태의 균열이 됨. (앞의 두번째)
- Inglis의 연구결과를 사용하면 인장 응력 S 가 작용하는 무한 평판에서 길이 $2a$ 인 균열의 끝부분에서의 응력 σ 는 다음과 같이 주어진다.



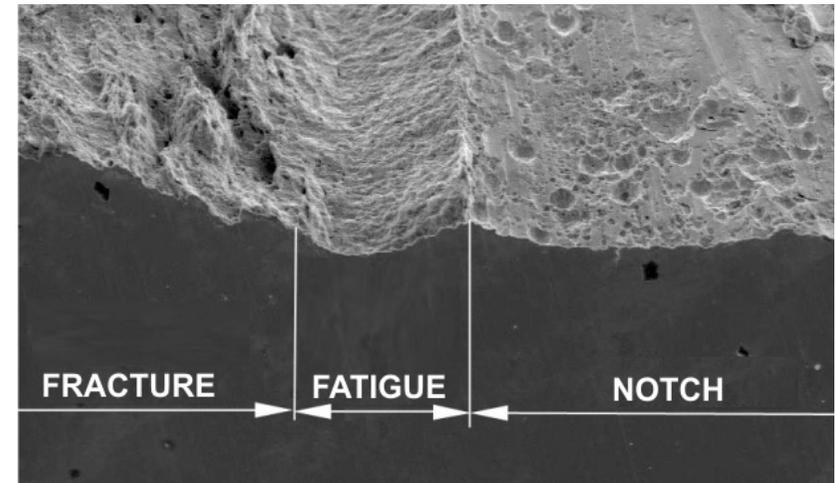
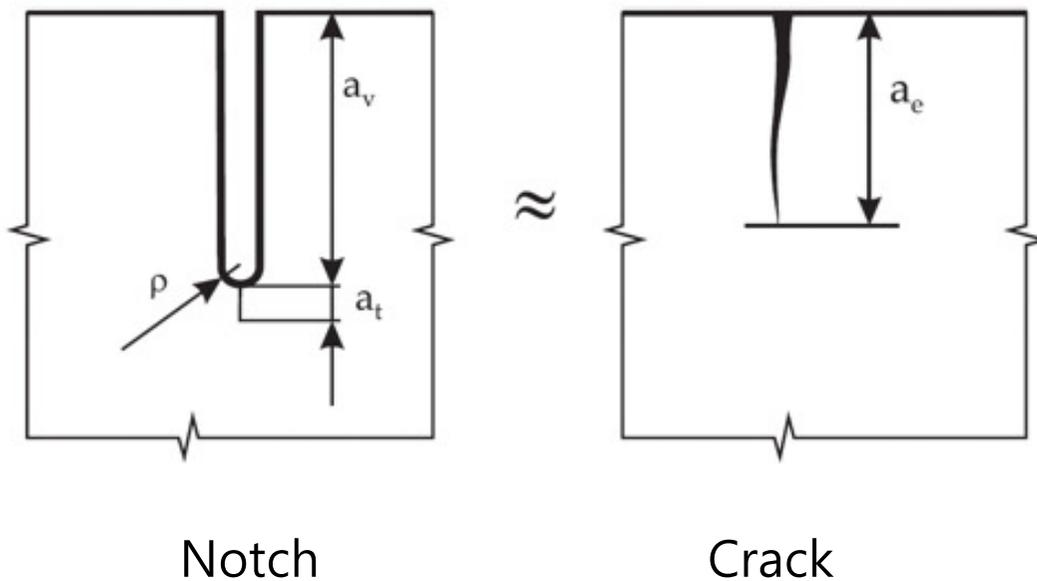
$$\sigma = S \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad \rho = \frac{b^2}{a}$$

$$K_t = \frac{\sigma}{S} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

ρ : 균열 끝부분에서의 곡률반경(radius of curvature)

날카로운 균열에서 응력집중계수

- 균열과 같이 날카로운 끝을 갖는 형상에 대해서는 곡률반경 $\rho \rightarrow 0$ 이 되므로 응력집중계수 $K_t \rightarrow \infty$ 가 되어 정의하기가 불가능 함.
- 실제로는 곡률반경이 유한한 값을 갖는 경우를 상정하게 되는데 이러한 경우를 노치 (notch)라고 한다.
- 균열과 노치의 차이점은 곡률반경의 크기에 따라 결정되며 극단의 응력 집중을 완화시키기 위해서는 균열이 발생되거나 내재되지 못하도록 해야 함.

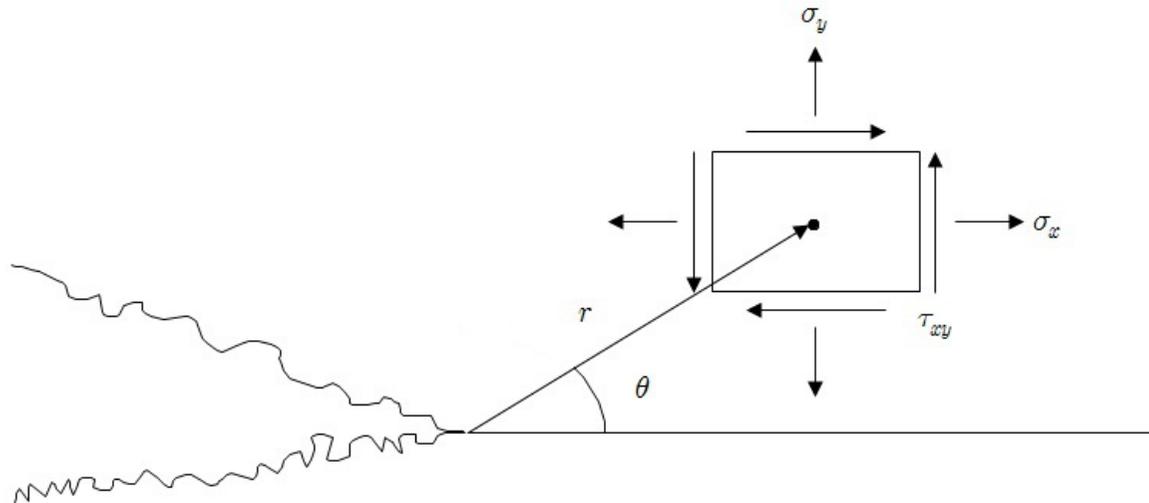


균열 근처에서의 응력의 분포

- 선형 탄성 재료에서 외력이 작용하는 경우에 균열 근처에서의 응력 분포는 탄성 방정식을 해석함으로써 구할 수 있음.
- 균열 앞부분에서 좌표로 표시한 응력은 다음과 같은 형태를 가짐

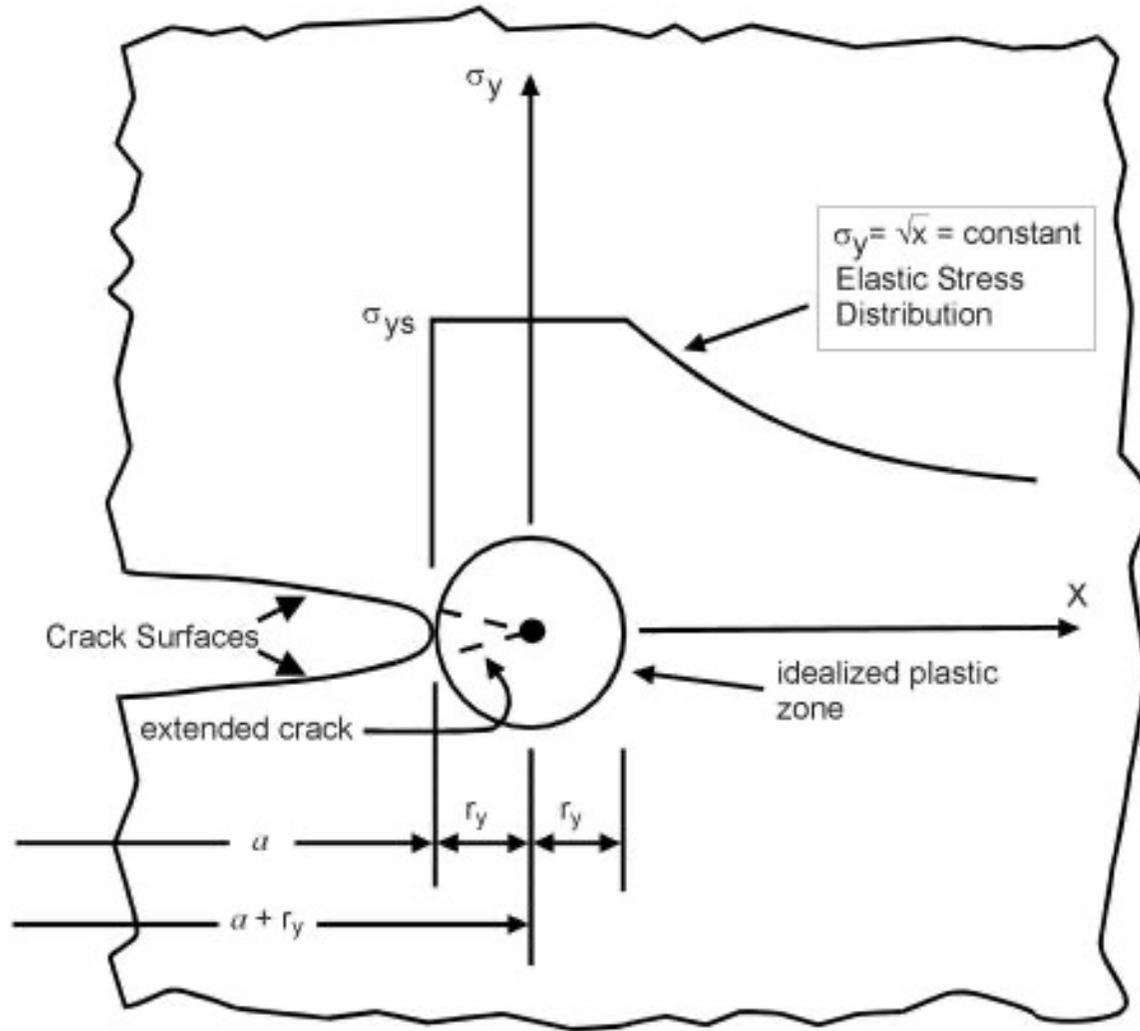
$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

- $r = 0$ 에서는 응력이 ∞ 가 됨 \rightarrow 비현실적이므로 실제로는 소성변형의 형태로 에너지를 소산 시킨다고 가정함.



균열 근처에서의 응력 분포와 극좌표

균열 근처에서 소성변형 구역



<https://www.youtube.com/watch?v=xmHWsD5Opg8>



균열 근처에서의 실제 응력 분포

- 선형 탄성 파괴역학에서 정의하는 균열 첨단 응력식

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \rightarrow \sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$$

$$K = YS\sqrt{\pi a}$$

r 과 θ : 는 균열 끝에 원점을 놓은 극좌표

K : 응력확대계수 (stress intensity factor, SIF)

Y : 시편의 형상과 균열모드에 대한 함수

S : 원거리에서 작용하는 명목 응력

a : 균열 길이의 절반

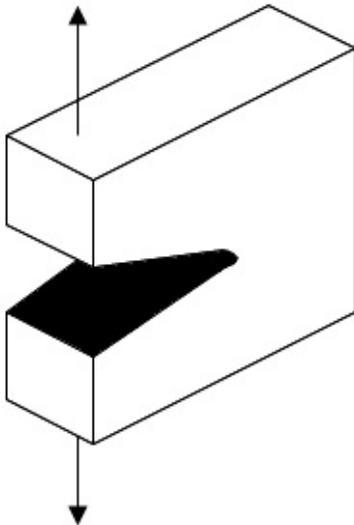


하중 모드에 의한 분류

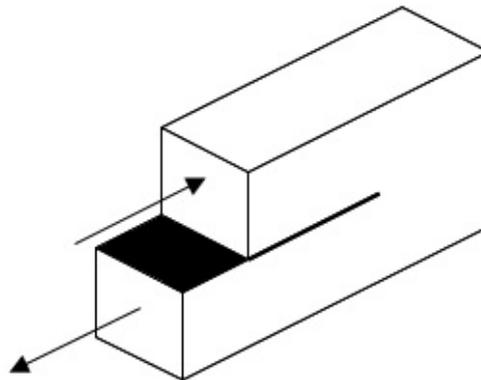
- 모드 I: 균열의 양면이 확대되는 방향으로 하중이 작용하는 경우, 열림 모드(opening mode) → K_I
- 모드 II: 균열 면내에서 전단이 일어나는 것으로 정의, 미끄럼 모드(sliding mode) → K_{II}
- 모드 III: 균열 표면을 벗어나는 방식의 전단이 일어나는 경우, 찢김 모드(tearing mode) → K_{III}

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad K = YS\sqrt{\pi a}$$

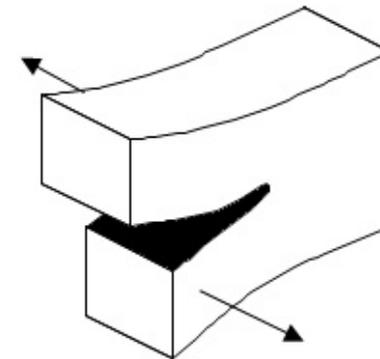
열림 모드(opening mode)



미끄럼 모드(sliding mode)



찢김 모드(tearing mode)



모드 1 에서의 응력분포

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$$

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

- 평면응력 상태에서는 $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ 이며,
- 평면 변형률 상태에서는 $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$, $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ 이다



형상에 따른 응력확대계수 (K)의 변화

■ 일반적으로 균열길이 a 와 시편의 폭 W 의 함수 $Y = f(a/W)$ 로 주어짐

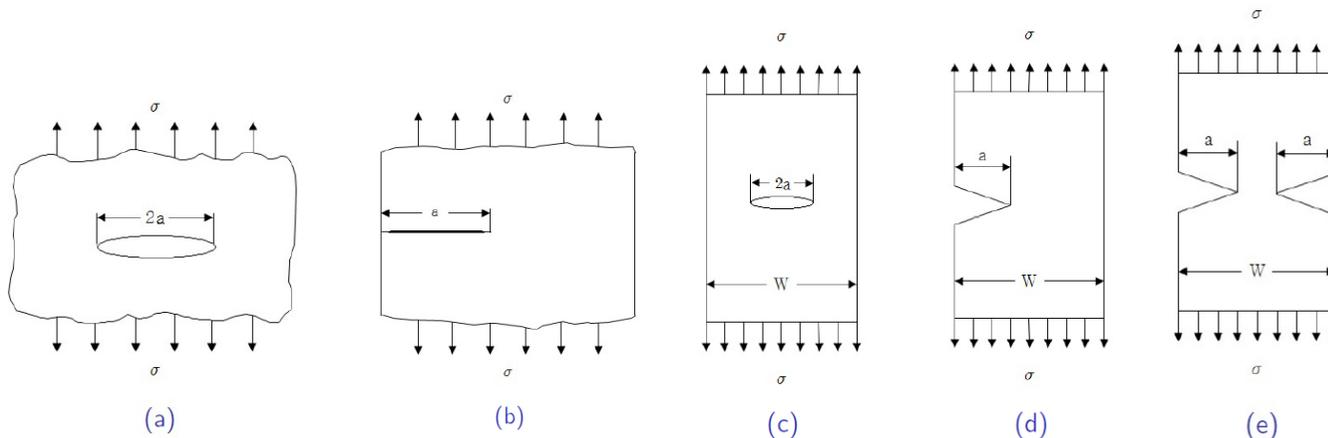
(a) 무한 크기 물체에서의 중앙 균열 $Y = 1$

(b) 무한 크기 물체에서의 모서리 균열 $Y = 1.12$

(c) 너비가 W 인 물체에서의 중앙 균열 $Y = \sqrt{\sec(\pi a/W)}$

(d) 너비가 W 인 물체에서의 모서리 균열 $Y = 1.12 - 0.231 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4$

(e) 너비가 W 인 물체에서의 양 모서리 균열 $Y = \frac{1.222 - 0.561 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 0.205 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.471 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 0.190 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}}$



균열 끝에서의 소성영역

■ 소성영역 계산

- 균열 끝 부분에서 **항복이 일어나서 소성변형이 생긴다고 가정하면 응력은 항복강도로 고풀이 되므로 응력 문제 (무한대)를 해결할 수 있음.** 즉, 항복이 일어나는 구역에서는 이론적으로 재료의 항복강도 보다 높은 응력을 가질 수 없기 때문임.
- 소성영역의 크기 계산: 탄성영역에서 주어진 균열 끝 부분의 응력분포 및 항복기준을 사용하여 예측. Tresca 항복기준과 von Mises 항복기준을 사용.
- 여기에서는 평면응력 상태와 모드 I에서의 조건으로 설명

균열 끝에서의 소성영역

■ 평면응력 상태의 경우

- 주응력을 사용해 표현하면 다음과 같음.

$$\sigma_{1,2} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 \pm \sin \frac{\theta}{2}\right) \quad \sigma_3 = 0$$

- 위의 식을 von Mises 항복기준인 식에 대입하여 소성영역 반경 r_1 에 대하여 풀면 평면 응력의 경우($\sigma_z = 0$) 다음과 같은 결과를 얻음.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_1)^2 = 2\sigma_Y^2$$

$$r_1(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2 \left(1 + \cos \theta + \frac{3}{2} \sin^2 \theta\right)$$



균열 끝에서의 소성영역

■ 평면변형률 상태의 경우

- 평면변형률 상태에서는 $\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2)$

$$\sigma_{1,2} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 \pm \sin \frac{\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_3 = \frac{2\nu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

- von Mises 항복기준인 식에 대입하여 소성영역 반경 r_1 에 대하여 풀면

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_1)^2 = 2\sigma_Y^2$$

$$r_1(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2 \left[(1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) + \frac{3}{2} \sin^2 \theta \right]$$



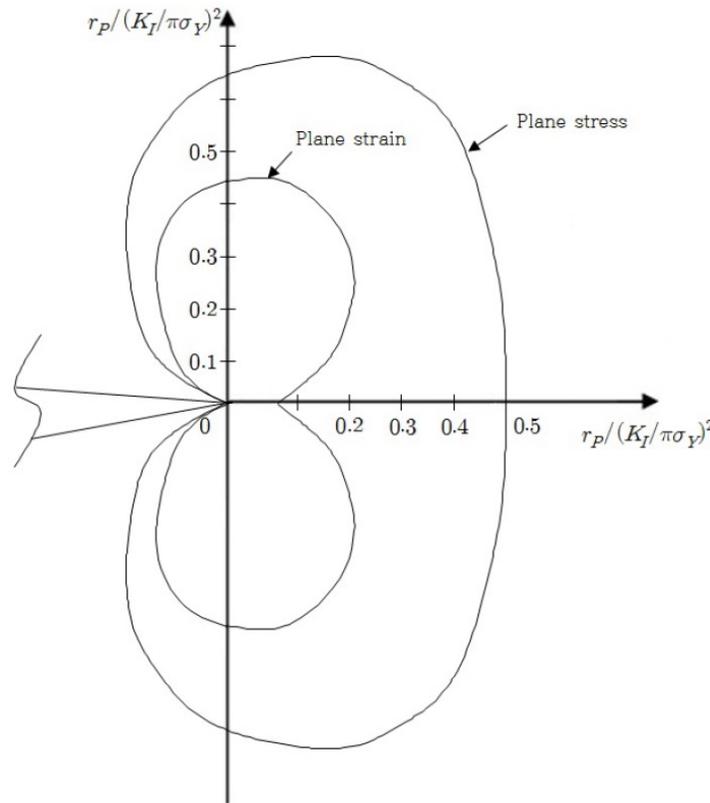
소성영역의 분포

평면응력 상태의 경우

$$r_1(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 (1 + \cos \theta + \frac{3}{2} \sin^2 \theta)$$

평면변형률 상태의 경우

$$r_1(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 [(1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) + \frac{3}{2} \sin^2 \theta]$$



균열 끝부분에서의 평면 응력과 평면 변형률 조건하에서의 소성영역 분포의 차이

Irwin의 소성영역 모델

■ Irwin 모델

- 균열 끝 바로 앞($\theta = 0$)에서의 응력 σ_y 가 항복강도 σ_Y 에 도달 하였을 때를 계산

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$



$$\sigma_Y = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos 0^\circ \left(1 + \sin 0^\circ \sin 0^\circ\right) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_1}}$$

r_1 : 균열 끝부분으로 부터 응력이 항복에 이르는 x 축 위의 거리

Irwin의 소성영역 모델

$$\sigma_Y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_1}} \quad \rightarrow \quad r_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$$

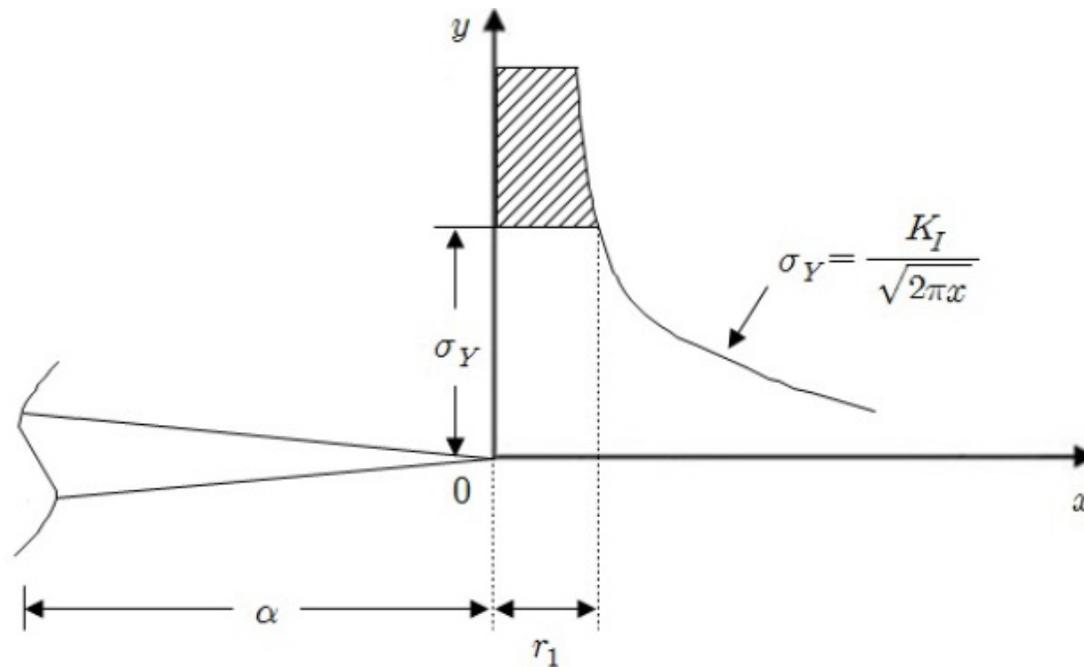


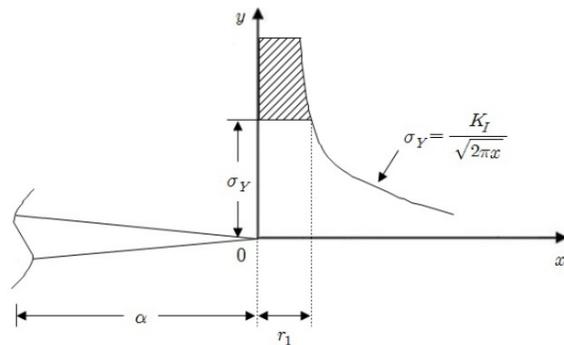
Figure: 균열 끝부분에서의 응력분포

Irwin의 소성영역 모델

■ 소성영역 계산

- 앞 그림의 빗금친 부분 만큼의 응력이 항복강도를 초과하는 부분으로 탄성영역에서의 힘의 의미를 갖음.
- **힘의 평형을 만족시키기 위해서는 빗금친 부분 만큼 초과된 응력이 균열 끝 부분에서 다시 분포되어야 하므로 항복이 일어나는 영역의 길이는 처음에 계산한 길이 r_1 보다 커져야 함을 알 수 있으며 다시 말하면 균열 끝부분에서의 소성영역이 확대되어야 함.**

$$\int_0^{r_1} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} dx = \sigma_Y r_Y \rightarrow r_Y = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 = 2r_1$$



$$r_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$$

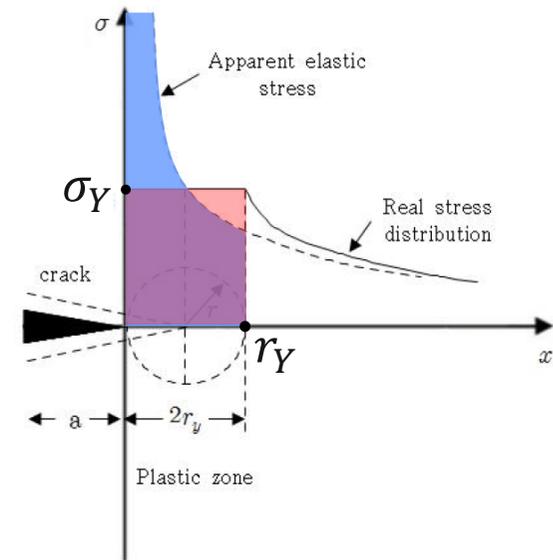


Figure: 균열 끝부분에서의 응력분포

Figure: 균열 끝부분에서의 응력분포



Irwin의 소성영역 모델

■ 유효균열길이

- 소성영역의 길이 r_Y 는 r_1 와 비교하여 2배의 값을 갖는다 ($r_Y = 2r_1$).
- 초과된 부분의 힘이 재분포 되어 균열 끝 부분에서의 소성영역을 확장시킨 것 임.
- 균열 끝부분이 탄성영역으로만 이루어져 있다고 가정한 경우에 비하여 소성영역 부분에서 더 큰 응력을 가지게 됨을 알 수 있으며 이는 K 값의 증가로 이어짐.
- Irwin은 이러한 K값의 증가를 보정하기 위하여 **가상적인 균열**을 생각하고 이를 위해서 **실제 길이보다 긴 유효 균열 길이 a_{eff}** 를 다음과 같이 도입하였다.

$$K = YS\sqrt{\pi a} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} a_{eff} &= a + r_1 \\ K_{eff} &= Y_{eff}S\sqrt{\pi a_{eff}} \end{aligned}$$

예제)

$$Y = 1$$

모드 I 상태에 있는 무한 크기의 평판의 중앙에 길이 $2a$ 인 균열이 있을 때 균열 끝부분에서의 소성영역을 고려하여 유효 응력확대계수 K_{eff} 를 구하시오. (단, 평면 응력 상태로 가정하시오.)

$$K_{eff} = S\sqrt{\pi(a + r_1)}$$

$$= S\sqrt{\pi\left(a + \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{eff}}{\sigma_Y}\right)^2\right)}$$

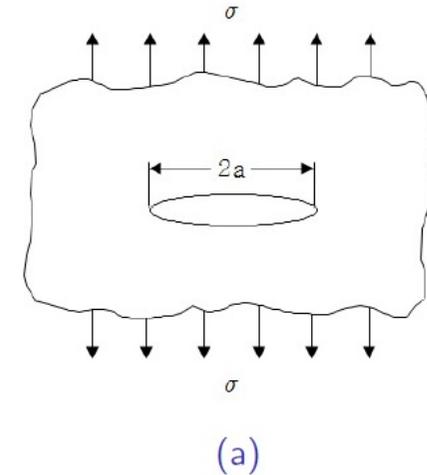
$$r_1 = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{eff}}{\sigma_Y}\right)^2$$

$$K_{eff}^2 = \pi S^2 \left(a + \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{eff}}{\sigma_Y}\right)^2\right)$$

$$= a\pi S^2 + \frac{S^2}{2}\left(\frac{K_{eff}}{\sigma_Y}\right)^2$$

$$K_{eff}^2 \left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{S}{\sigma_Y}\right)^2\right) = a\pi S^2$$

$$\therefore K_{eff} = \frac{S\sqrt{a\pi}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2}\left(\frac{S}{\sigma_Y}\right)^2}}$$



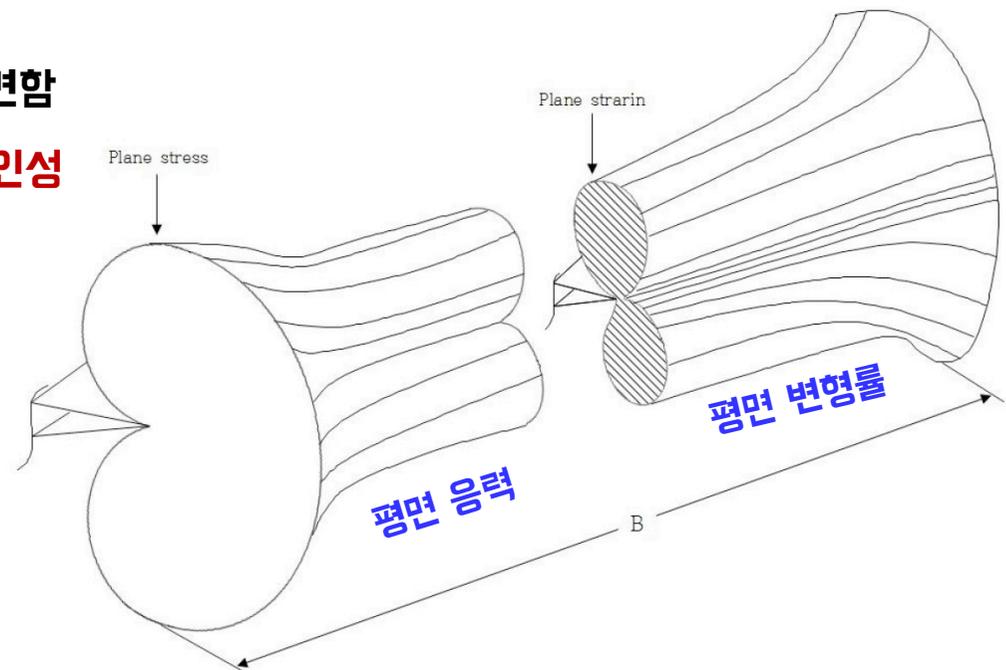
파괴인성

- 파괴인성(fracture toughness)은 재료의 특성으로서 파괴에 대하여 저항하는 정도를 나타 내는 물리량임. 파괴인성이 높을수록 파괴에 대하여 잘 견뎌줌을 의미.

$$K = YS\sqrt{\pi a} \longrightarrow K_C = YS\sqrt{\pi a} \longrightarrow K_{IC} = S\sqrt{\pi a}$$

파괴시험 충분히 두꺼운 시편

- 앞에서 학습한 응력확대계수는 그 자체로서는 큰 의미가 없으며 균열을 감안한 설계를 수행하기 위해서는 파괴인성에 대한 자료가 반드시 필요함.
- 파괴인성 값은 시험 시편의 두께에 따라 값이 변함
- **일정 두께 이상의 시편 사용: 평면 변형률 파괴인성**
- **얇은 두께의 시편 사용: 평면 응력 파괴인성**



파괴인성

■ 평면변형률 파괴인성 K_{IC}

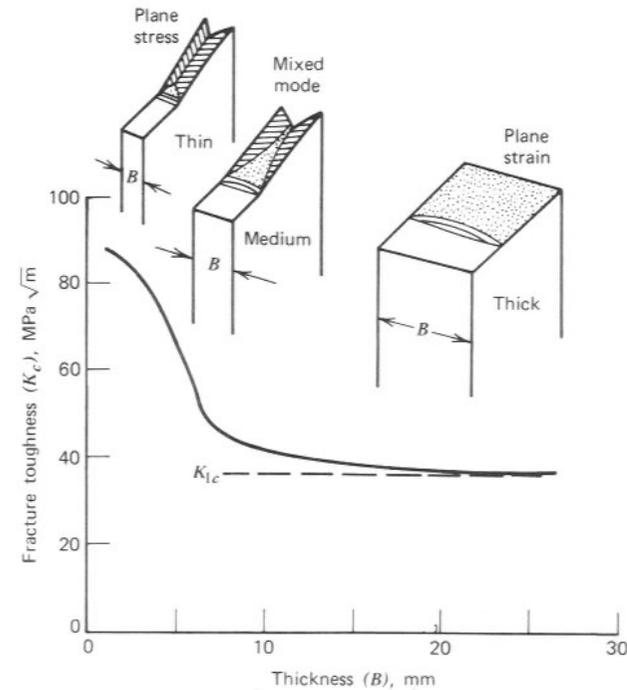
- 평면 변형률 파괴인성 K_{IC} 는 재료파괴인성 K_C 보다 작음. 따라서 K_{IC} 에 기준을 두고 설계를 한다면 보수적인 접근이 됨. (일반적인 설계의 기준)

- 평면 변형률 파괴인성 시험은 *ASTM E399*에 준해서 시행됨. (표준 시험 규격)

- $B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2$ (시료 두께 조건)

- $a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2$ (시료 균열 조건)

- $w \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2$ (시료 폭 조건)



시편 두께에 따른 K_C 값의 변화 추이

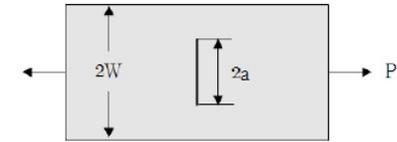
다양한 시료에서 응력확대계수 K_I

■ 모드 I 에서의 응력확대계수

$$K_I = Y S \sqrt{\pi a} \rightarrow K_I = \frac{P}{B \sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \text{where } Y = \frac{P}{B \sqrt{W}}$$

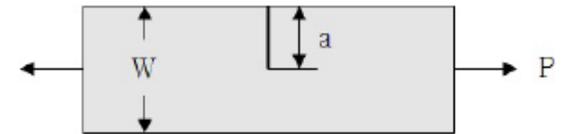
- 중앙 균열 인장 (CCT, Central Crack Tension)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$$



- 단일 모서리 노치 인장 (SENT, Single Edge Notch Tension)

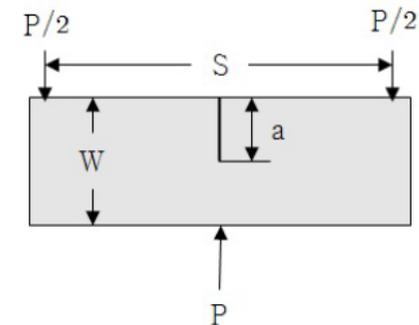
$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \left[0.752 + 2.02 \frac{a}{W} + 0.37 \left(1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2W}\right)\right)^3\right]$$



- 단일 모서리 노치 굽힘 (SENB, Single Edge Notch Bend)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = Y_1 \left\{1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left[2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right]\right\}$$

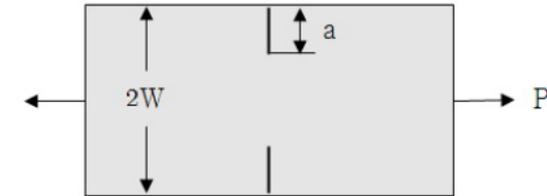
$$\text{where, } Y_1 = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{a/W}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$



다양한 시료에서 응력확대계수 K_I

■ 모드 I 에서의 응력확대계수

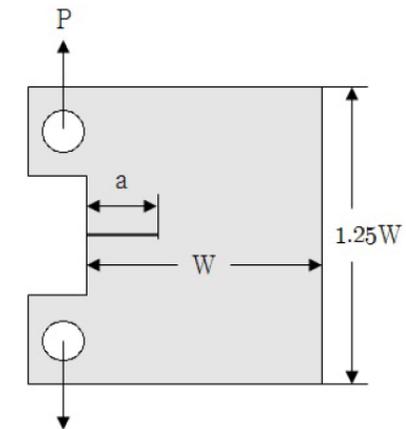
$$K_I = YS\sqrt{\pi a} \rightarrow K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad = Y$$



- 양 모서리 노치 인장 (DENT, Double Edge Notch Tension) (d)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = Y_1 \left\{ 1.122 - 0.561 \left(\frac{a}{W}\right) - 0.205 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.471 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0.190 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\}$$

where, $Y_1 = \frac{\sqrt{\pi a / 2W}}{\sqrt{1 - (a/W)}}$



- 소형 인장 시편 (CT, Compact Tension Specimen)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = Y_1 \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

where, $Y_1 = \frac{2 + (a/W)}{(1 - a/W)^{3/2}}$



임계 균열 길이

- 모드 I에서 만일 응력 S 의 크기가 변하지 않는다면 균열의 길이 a 가 임계 균열 길이 a_c 와 같아질 때, 즉, $a = a_c$ 일때 $K = K_{IC}$ 가 됨.

$$K = K_{IC} = YS\sqrt{\pi a_c}$$

- $a < a_c$ 인 경우에는 파괴되지 않음.
- 그러나, 하중에 의하여 균열이 점차로 성장하여 $a = a_c$ 로 되는 순간 파괴가 발생할 수 있음.