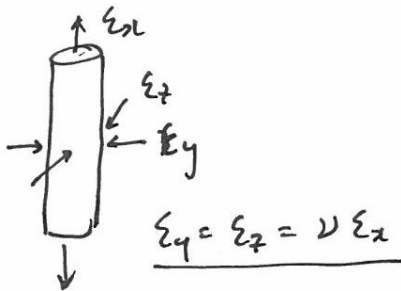


II편 박판금속의 성형

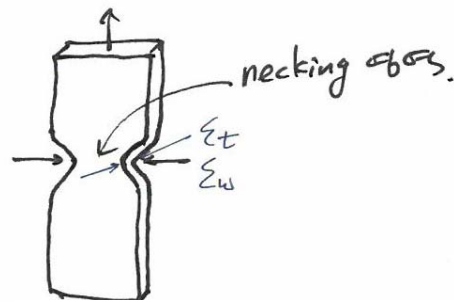
1. 재료의 이방성

- 박판금속 ~ 생산과정에서 압연과 소둔의 반복에 의해서 금속 내부에 조직이 결정학적으로 방향성을 가지고 배열 \Rightarrow 이방성을 가짐

- 등방성 소재와 이방성 소재의 인장실험



• 인장변형률 대비 폭방향 변형률이 1/2로 동일

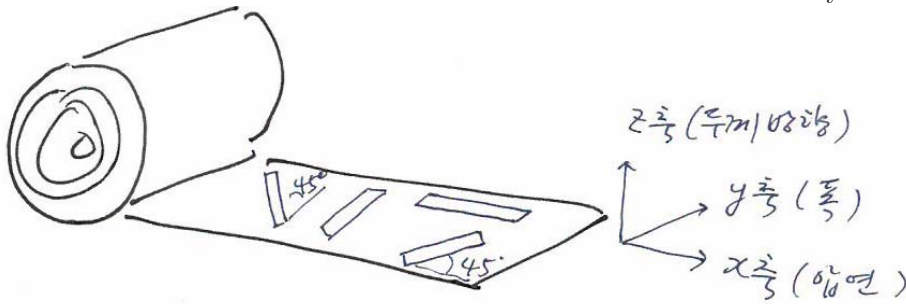


• R-Value : 두께 방향의 변형률 ϵ_t 에

대한 폭방향 변형률 ϵ_w 의 비

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} : \text{이방성의 척도}$$

- R-Value 측정



$$\bar{R} = \frac{R + 2Q + P}{4}$$

Q : 압연방향의 45° 방향에서 얻은 R값

R : 압연방향에서 얻은 R값

P : 압연방향의 90° 에서 얻은 R값

(cf) 등방성 재료 : $R = 1$ ($\epsilon_t = \epsilon_w$)

- R 값이 1보다 크다 ($\epsilon_t < \epsilon_w$) : 인장시 두께 감소에 대한 저항이 크다.

→ 드로잉성(Drawing ability)이 좋음, 이방성 성질이 크다(earring)

| <i>Material</i> | <i>R-Value</i> |
|-----------------|----------------|
| Killed Steel | 1.4 – 1.8 |
| Al | 0.5 – 0.7 |
| Copper | 0.6 – 0.7 |
| Titanium | 2.9 – 4.2 |

2. 이방성 소성이론 (Hill)

- (기본 가정) ① 재료 내부의 각 점에서 상호 직각을 이룸 (좌표계 유리)
- ② 인장 항복응력과 압축 항복응력이 같음
(no Baushinger effect)

$$2f(\sigma_{ij}) = \bar{\sigma}^2 = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad \text{--- ①}$$

여기서 $\bar{\sigma}$: 유효응력 , F, G, H, L, M, N : 재료의 변형이력에 따라 변할 수 있는 이방성 계수

→ F, G, H 는 재료의 인장실험에서 구할 수 있음

Y_x, Y_y, Y_z : 각 방향의 항복응력

from ① ,

$$G + H = (k/Y_x)^2$$

$$F + H = (k/Y_y)^2 \quad \text{--- ②}$$

$$F + G = (k/Y_z)^2 \quad (\text{실제로는 두께방향 인장 실험 불가})$$

($\bar{\sigma} = k$ 로 둠)

→ L, M, N : 순수전단 변형시험에서 구함

$$d\epsilon_{ij} = d\lambda \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right) \text{로 부터}$$

- 응력-변형률 관계식 (변형률 증분식)

$$d\epsilon_x = [-G(\sigma_z - \sigma_x) + H(\sigma_x - \sigma_y)] d\lambda$$

$$d\epsilon_y = [F(\sigma_y - \sigma_z) - H(\sigma_x - \sigma_y)] d\lambda$$

$$d\epsilon_x = [-F(\sigma_y - \sigma_z) + G(\sigma_z - \sigma_x)] d\lambda$$

— ③

$$d\gamma_{yz} = 2L\tau_{yz} d\lambda$$

$$d\gamma_{zx} = 2M\tau_{zx} d\lambda$$

$$d\gamma_{xy} = 2N\tau_{xy} d\lambda$$

* 특수조건 하에서 Hill의 이방성이론

- (1) 유효응력 $\bar{\sigma}$ 을 x -방향 인장시험에서의 항복응력 Y_x 와 일치한다고 가정.
식 ①에서

$$\bar{\sigma}^2 = (G+H)\sigma_x^2 = Y_x$$

$$\therefore G+H=1 \quad \text{--- ④}$$

- (2) x -방향의 인장시험 ($\sigma_x, \sigma_y = \sigma_z = 0$)에서 소성변형률 비 $R (= \epsilon_y/\epsilon_z)$
(y : 폭방향, z : 두께방향)

식 ③에서

$$\begin{aligned} R = \frac{d\epsilon_y}{d\epsilon_z} &= \frac{[F(\sigma'_y - \sigma'_z) - H(\sigma_x - \sigma'_y)]d\lambda}{[-F(\sigma'_y - \sigma'_z) + G(\sigma'_z - \sigma_x)]d\lambda} \\ &= \frac{H}{G} \quad \therefore R = \frac{H}{G} \quad \text{--- ⑤} \end{aligned}$$

- (3) y -방향의 인장시험($\sigma_y, \sigma_x = \sigma_z = 0$)에서 소성변형률 비 $P (= \epsilon_x/\epsilon_z)$

$$\begin{aligned} P = \frac{d\epsilon_x}{d\epsilon_z} &= \frac{[-G(\sigma'_y - \sigma'_z) + H(\sigma'_x - \sigma_y)]d\lambda}{[-F(\sigma_y - \sigma'_z) + G(\sigma'_z - \sigma'_x)]d\lambda} \\ &= \frac{H}{F} \quad \therefore P = \frac{H}{F} \quad \text{--- ⑥} \end{aligned}$$

- 식 ④, ⑤, ⑥에서

$$\therefore F = \frac{R}{P(1+R)}, \quad G = \frac{1}{(1+R)}, \quad H = \frac{R}{(1+R)} \quad \text{--- ⑦}$$

- 따라서, 주응력($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)만 존재하는 경우 Hill 식은 다음과 같다.

$$\therefore 2f = \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{P(1+R)} [R(\sigma_y - \sigma_z)^2 + P(\sigma_z - \sigma_x)^2 + RP(\sigma_x - \sigma_y)^2] \quad \text{--- ⑧}$$

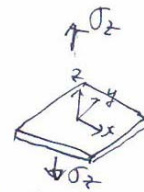
(※ R, P 는 실험에서 구한다)

- 이 경우 응력-변형률증분 관계식은

$$d\epsilon_x = \frac{P}{P(1+R)} [-(\sigma_z - \sigma_x) + R(\sigma_x - \sigma_y)] d\lambda,$$

$$d\epsilon_y = \frac{R}{P(1+R)} [(\sigma_y - \sigma_z) - P(\sigma_x - \sigma_y)] d\lambda \quad \text{--- ⑨}$$

$$d\epsilon_z = \frac{1}{P(1+R)} [-R(\sigma_y - \sigma_z) + P(\sigma_z - \sigma_x)] d\lambda$$



* 평면응력($\sigma_z=0$)의 경우 Hill 식 (참고)

: 박판소재 → 두께가 매우 얇음 → 두께 방향으로 작용하는 응력을 무시

$$2f = \bar{\sigma}^2 = \sigma_x^2 + \frac{R(1+P)}{P(1+R)} \sigma_y^2 - \frac{2RP}{P(1+R)} \sigma_x \sigma_y + 2N\tau_{xy}^2$$

$$d\epsilon_x = \left(\sigma_x - \frac{R}{1+R} \sigma_y \right) d\lambda$$

$$d\epsilon_y = \left(\frac{R(1+P)}{P(1+R)} \sigma_y - \frac{R}{1+R} \sigma_x \right) d\lambda$$

$$d\epsilon_z = - \left(\frac{1}{1+R} \sigma_x + \frac{R}{P(1+R)} \sigma_y \right) d\lambda$$

$$d\gamma_{xy} = 2N\tau_{xy} \lambda d$$

여기서 $N = \frac{(Q+0.5)(R+P)}{P(1+R)}$, Q : 압연방향 45° 의 인장시험에서 소성변형률비

3. 성형한계도 및 소성불안정 이론

- 개요

박판금속 성형시, 파단(fracture), 주름 발생(wrinkling) 등 성형 불량을 예측할 수 있는 방법론이 필요.

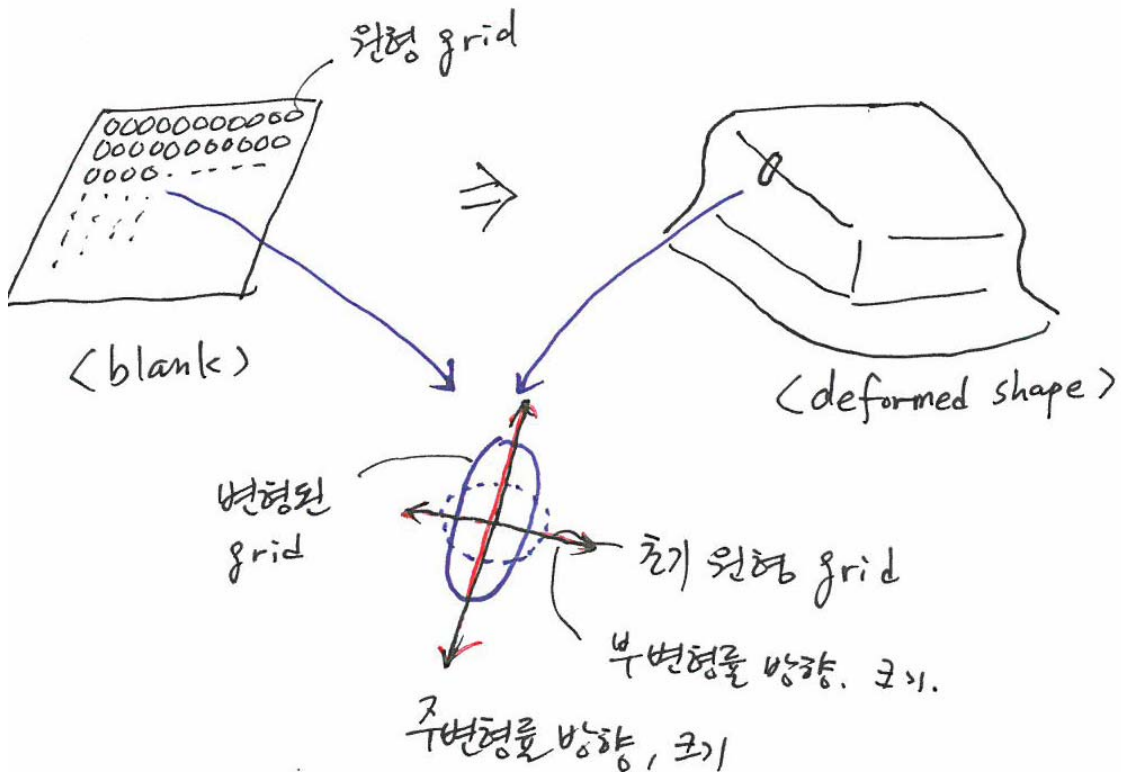
- 성형한계도(forming limit diagram; FLD) ~ 초기 박판 금속 표면에 작은 원형 그릿드(grid)를 부식법으로 마킹하여 성형 후, 그것의 변형 상태를 측정하여 변형 분포를 파악함

< 보조 자료 참조 >

* 성형한계도 실험 방법

1) 변형의 측정 (grid 법)

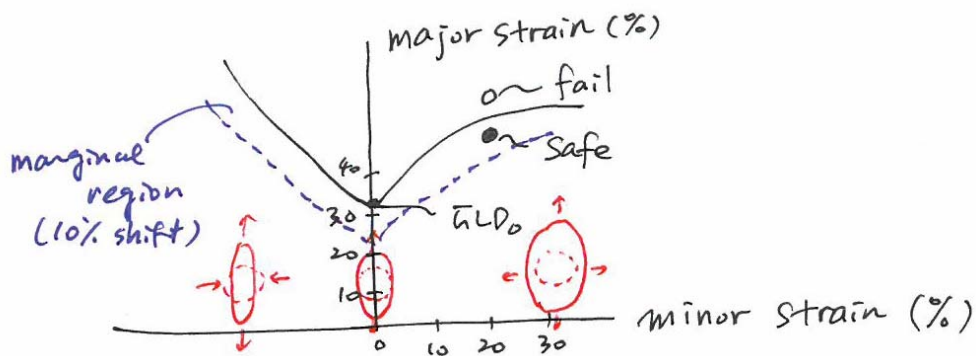
- 판면에 작용하는 두 주변형률(major, minor strain) 측정은 원형 그릿드법을 주로 사용함.
- 판재의 한 면에 원형의 그릿드를 마킹(ex, 전기적 에칭)하여 변형시키게 되면 그 원은 타원이 된다. 그 타원의 장축, 단축의 길이와 방향을 측정하게 되면 주 변형률, 부변형률과 그 방향이 구해진다.



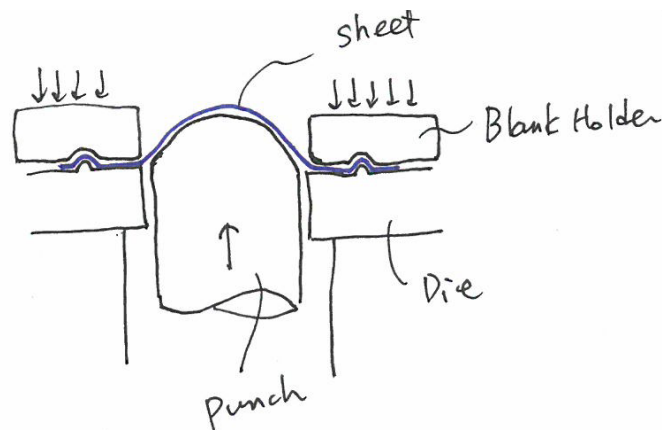
- 원형 grid 크기가 너무 크면 국부적인 변형을 나타내기 어렵고 너무 작은 경우는 측정오차가 커지게 됨
- 따라서 제품의 크기, 모양에 따라 적절한 크기의 Grid 원을 선택.
- ⇒ Grid size ↓ → 성형한계가 약간씩 높아지고 실제에 가까워짐

2) 성형한계도(FLD)

- 박판성형기술이 예술의 경지에서 과학의 한 분야로 전환.
→ Grid에 의한 변형측정기술, 성형한계도
(1960년대 중반 Keeler, Backofen, Goodwin 등 제안)
- 성형한계도? → 판면의 주 및 부 변형률의 비를 변화시켜서 파단이 일어나는 한계 시점에서 주 및 부 변형률을 평면상에 도시한 것.

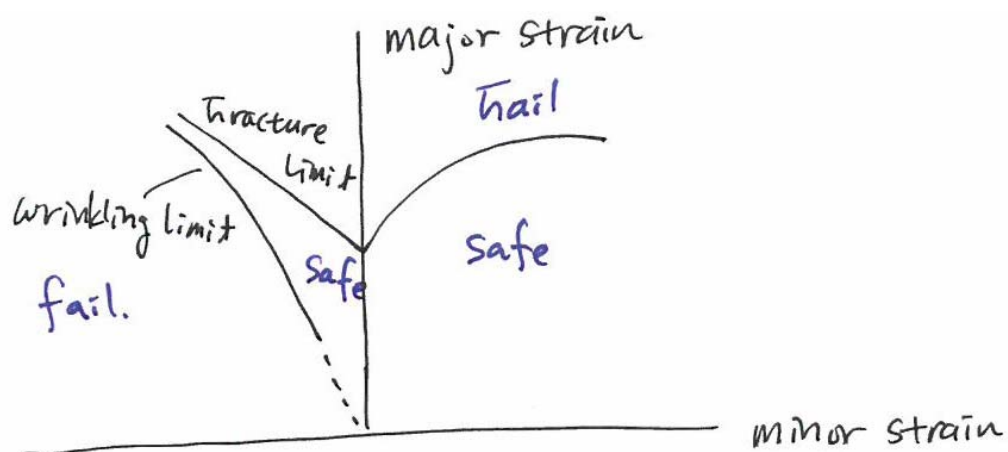


- 주로 원형 그릿드가 새겨진 판재를 링 형상의 다이로 완전 고정된 상태에서 반구형 펀치로 파단이 일어날 때까지 눌러서 파단부 주위의 변형된 원의 장축과 단축의 길이를 측정함으로써 얻어짐.



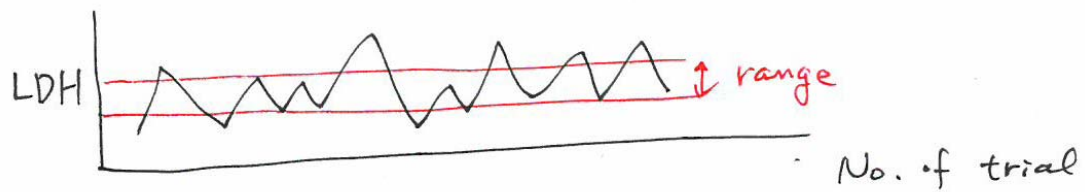
<Punch-Stretching 공정>

- Punch-Stretching 실험에서 Blank 형상, Blank holding 압력 등의 조절을 통해 파단부 주근의 주-부 변형률 비를 변화시킬 수 있음.
- FLD의 한계변형률은 ①초기 원형 Grid의 크기, ②시편의 채취한 방향, ③판의 두께, ④변형이력, ⑤변형률 속도, ⑥온도조건, ⑦윤활조건(punch-blank 사이)에 따라 영향을 받는다.
(※ 변형이력은 크게 영향을 주지는 않음)
- 판재가 두꺼울수록 → 성형한계 ↑
punch-blank 윤활조건이 좋을수록 → 성형한계 ↑
- FLD를 이용하여 성형 난이도(forming severity)를 평가할 수 있음.
- 주름(wrinkling) 현상에 대한 한계를 측정하여 FLD 상에 표기하면 보다 유용한 자료가 됨.



3) LDH (Limiting Dome Height)

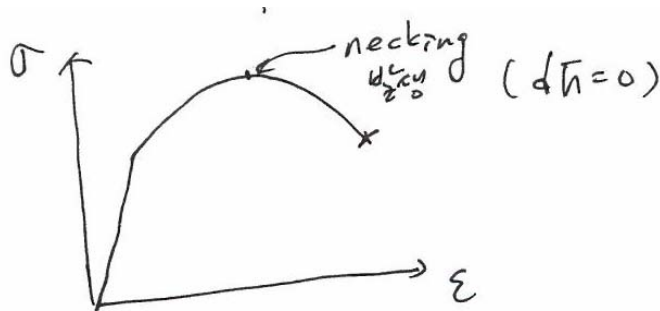
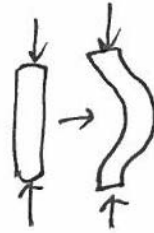
- 성형한계도에서 가장 낮은 점(부변형률 = 0, FLD_0) 부근에서 punch-stretching 시험에서 파단이 일어날 때까지의 펀치가 진행한 거리
- LDH 값으로 성형 난이도를 평가함(미국 자동차 회사 규격)



* 소성불안정 현상

1) 소성불안정

- 압축시 → Bucking(좌굴) 발생
- 인장시 → 파단 현상(fracture)



- 네킹이 유발되면 하중을 증가시키지 않더라도 변형은 계속적으로 진행
 → 시편의 단면적이 국부적으로 빠르게 감소하므로, 재료의 가공경화에 의한 하중 증가보다 단면적 수축에 의한 하중 감소의 영향이 더 크기 때문에 불안정해짐 (plastic instability)

$$F = \bar{\sigma} A \quad \text{--- ①}$$

$$dF = \bar{\sigma} dA + A d\bar{\sigma} = 0 \quad \text{--- ② : 소성 불안정 영역 (necking 시)}$$

$$\text{여기서 } \frac{dA}{A} = - d\bar{\epsilon} \text{ 이므로} \quad \text{--- ③}$$

$$\text{② : } \bar{\sigma} = - \frac{A}{dA} d\bar{\sigma} = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}}$$

$$\therefore \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{1} \quad \text{--- ④}$$

$\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^{-n}$ 으로 두면,

$$\text{④ : } \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = n k \bar{\epsilon}^{-n-1} = \bar{\sigma} = k \bar{\epsilon}^{-n} \quad \therefore n = \bar{\epsilon} \text{ (가공경화지수는 necking시 변형률값)}$$

- Necking의 두 가지

- ① 확산 네킹 - (Diffuse necking)
- 하중이 최대점에 이르면 일어나기 시작,
(하중-변위 곡선에서 하중은 변위 증가에 따라 서서히 감소)
 - 하중이 제거되면 부분적으로 판재 두께가 불균일이 존재
→ 제품 표면상 결함을 남기는 것은 아님
→ 두께 편차는 발생

- ② 국부 네킹 - (Local necking)
- 좁은 선상의 영역을 따라 국부적으로 판재의 두께가 감소
 - 네킹이 시작되면 하중의 증가 없이 변위 증가 발생
→ 곧 파단에 이름
 - 국부 네킹이 발생할 때까지를 '성형한계'라 함
 - 국부 네킹은 확산 네킹이 어느 정도 진행된 다음 발생

