4. 용접이음의 강도 설계

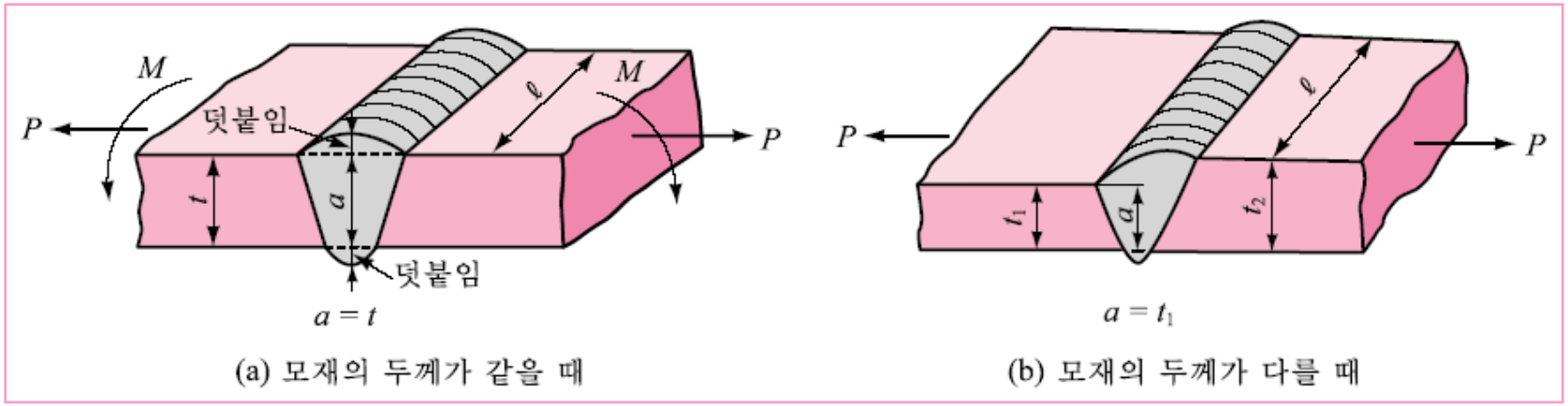
(1) 맞대기 이음(butt joint)

P : 인장하중, a : 목두께, t : 모재의 두께,
ℓ : 용접길이, σ_t : 인장응력

$$P = \sigma_t \cdot a\ell = \sigma_t \cdot t\ell \qquad (4 \cdot 27)$$

- 모재의 두께가 서로 다를 때 ⇒ 두께가 작은 쪽 선택

$$P = \sigma_t \cdot a\ell = \sigma_t \cdot t_1\ell \qquad (4 \cdot 28)$$



<그림 4-35> 맞대기 이음의 하중

- 굽힘 모멘트 M가 작용할 때 ⇒ 용접부의 굽힘응력

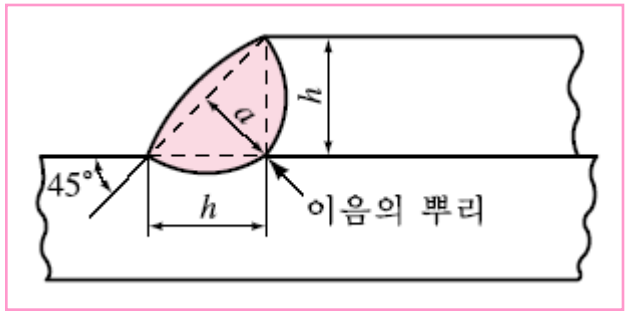
$$M = \sigma_b \cdot Z = \sigma_b \cdot \frac{a^2 \ell}{6} = \sigma_b \cdot \frac{t^2 \ell}{6} \qquad (4 \cdot 29)$$

- 안전성 고려 : $a = t - 1$ [mm]

(2) 겹치기 이음(lap joint)

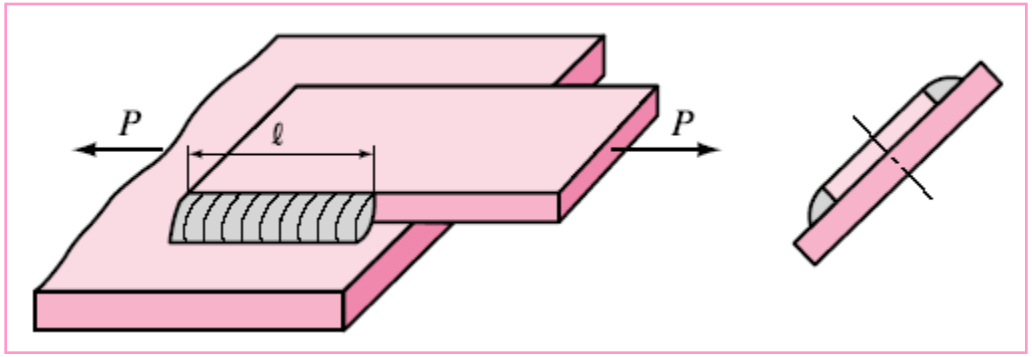
h : 용접 사이즈(weld size), a : 목두께

$$a = h\cos 45° = \frac{h}{\sqrt{2}} = 0.707h \qquad (4 \cdot 30)$$



<그림 4-36> 필릿 용접 이음

① 옆면 필릿 용접 이음



<그림 4-37> 옆면 필릿 용접 이음

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{2a\ell} = \frac{P}{2(0.707h\ell)} = \frac{P}{1.414h\ell} \qquad (4 \cdot 31)$$

$$\therefore\ P = \tau \cdot A = 1.414h\ell\tau \qquad (4 \cdot 32)$$

- 용착금속의 전단강도 : 인장강도의 약 80 [%]

② 앞면 필릿 용접 이음

P : 인장하중, P_n : 목단면에 수직한 하중,

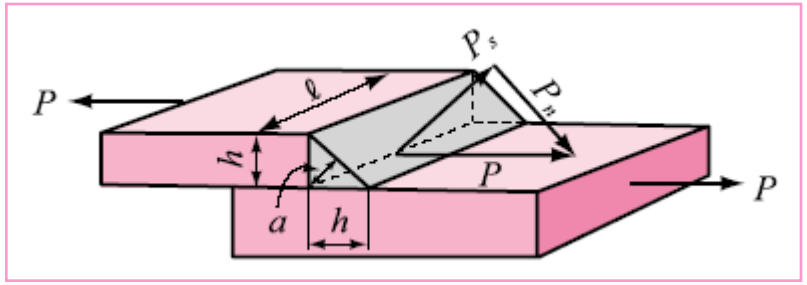
P_s : 목단면에 평행한 하중, σ_n : 수직응력, τ : 전단응력

$$P_n = P\sin 45° = 0.707P \text{ (인장력)}, \qquad P_s = P\cos 45° = 0.707P \text{ (전단력)}$$

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} = \frac{P_n}{0.707h\ell} = \frac{P}{h\ell} \text{ (인장응력)}, \quad \tau = \frac{P_s}{A} = \frac{P_s}{0.707h\ell} = \frac{P}{h\ell} \text{ (전단응력)}$$

- 최대주응력 σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_n}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{2}\right)^2 + \tau^2} = \frac{1.618P}{h\ell}$$



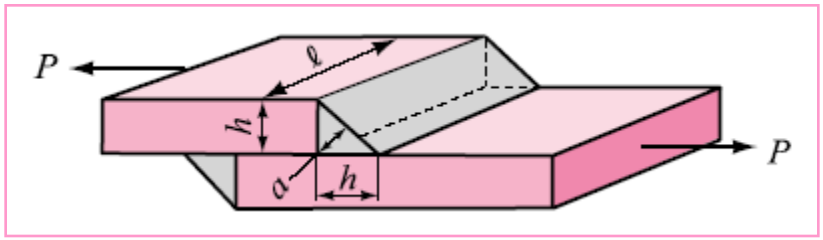
<그림 4-38>
앞면 필릿 용접 이음(한면 이음)

▪ 용접이음의 파단하중은 $\sigma_{max} = \sigma_t$로 하면

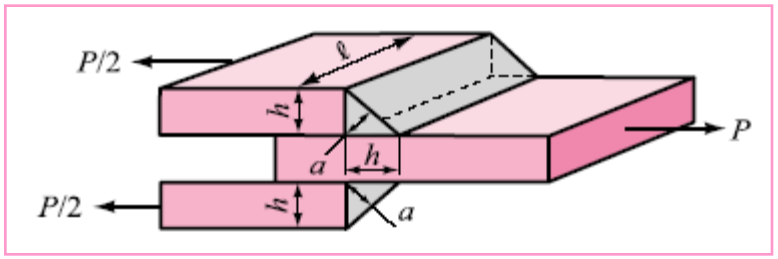
$$P = \frac{\sigma_t h \ell}{1.618} \tag{4 • 33}$$

$$P = \frac{\sigma_t h \ell}{1.414} \quad \text{또는} \quad P = \frac{\tau h \ell}{1.414} \tag{4 • 34}$$

$$P = \frac{\sigma_t h \ell}{0.707} \tag{4 • 35}$$



<그림 4-39>
앞면 필릿 용접 이음(양면 이음)



<그림 4-40>
앞면 필릿 용접 이음(양쪽 이음)

③ 비대칭 단면을 갖는 필릿 용접이음

τ_a : 인장하중 P에 의한 용접부의 허용 전단응력

$$P = P_1 + P_2 = a(\ell_1 + \ell_2)\tau_a = \frac{h}{\sqrt{2}}\ell\tau_a = 0.707h\ell\tau_a \qquad (4 \cdot 36)$$

여기서 $P_1 = \tau_a(a\ell_1)$, $P_2 = \tau_a(a\ell_2)$, $\ell = \ell_1 + \ell_2$

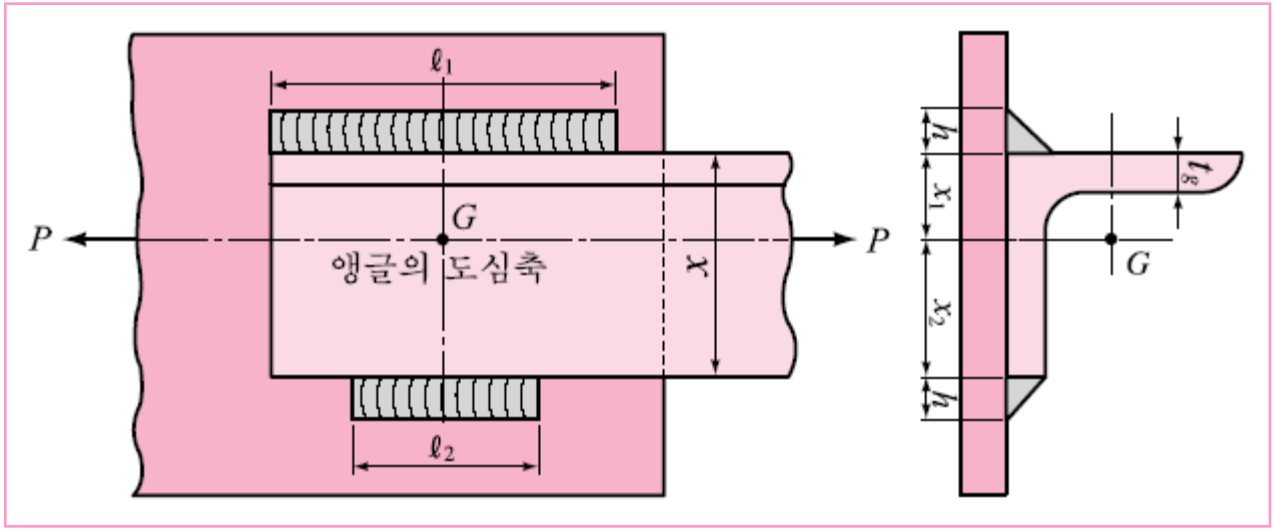
- 용접이음의 도심에 대한 모멘트의 평형을 고려하면

$$a\ell_1\tau x_1 = a\ell_2\tau x_2$$

$$\therefore\ \ell_1 x_1 = \ell_2 x_2$$

- 용접길이 : $x_1 + x_2 = x$라고 하면

$$\ell_1 = \frac{\ell x_2}{x}, \quad \ell_2 = \frac{\ell x_1}{x} \qquad (4 \cdot 37)$$



<그림 4-41> 비대칭 단면을 갖는 필릿 용접 이음

④ 편심(偏心)하중을 받는 필릿 용접 이음

- 필릿 용접을 한 구조물에 편심하중 P가 작용

  ⇒ 용접부의 도심 O에 직접 작용하는 전단력 P와 비틀림 모멘트 T에 의한 2개의 전단응력의 합

- 전단력 P에 의한 전단응력 τ_2 :

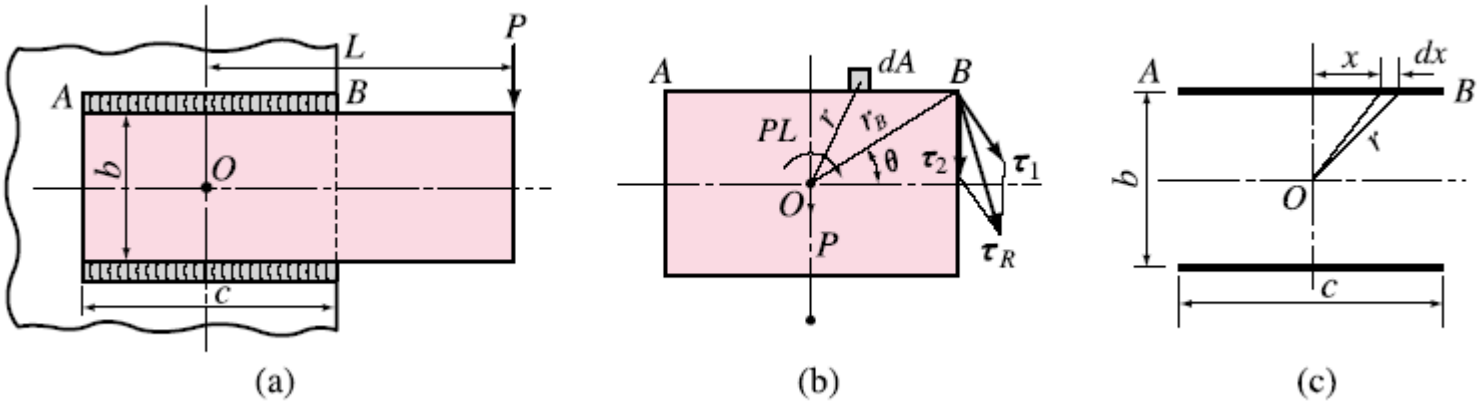
$$\tau_2 = \frac{P}{A} = \frac{P}{0.707h\ell} \qquad (4 \cdot 38)$$

여기서, 용접부의 길이 : $\ell = 2c$

- 용접부의 임의 점에 대한 전단응력 τ는 도심 O로부터의 거리에 비례하면

$$\frac{\tau}{r} = \frac{\tau_1}{r_B}$$

τ_1 : O에서 가장 먼거리 r_B에 있는 B점의 최대응력



<그림 4-42> 편심하중을 받는 필릿 용접 이음

- 용접면에 대한 전체 비틀림 모멘트 T :

$$T = PL = \int r\tau dA = \frac{\tau_1}{r_B}\int r^2 dA = \frac{\tau_1 I_p}{r_B} \qquad (4 \cdot 39)$$

$I_p = \int r^2 dA$: 용접부 단면의 극단면 2차 모멘트

- 용접이음을 선으로 취급 ⇒ 도심 O에 관한 용접선 AB의 극단면 2차 모멘트를 I_{p1}는

$$I_{p1} = \int r^2 dx = 2\int_0^{\frac{c}{2}} \left\{ \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2 \right\} dx = \frac{b^2 c}{4} + \frac{c^3}{12} = \frac{c}{12}(3b^2 + c^2)$$

- 전체 용접선의 극단면 2차 모멘트 I_o :

$$I_o = 2I_{p1} = \frac{c(3b^2 + c^2)}{6} \qquad (4 \cdot 40)$$

- 용접부의 목두께가 a인 단면의 극단면 2차 모멘트 I_p :

$$I_p = aI_o = 0.707hI_o$$

이것을 식 (4 • 39)에 대입한 후 정리하면

$$\tau_1 = \frac{PLr_B}{I_p} = \frac{PLr_B}{0.707hI_o} \qquad (4 \cdot 41)$$

여기서 $r_B = \sqrt{\dfrac{b^2 + c^2}{4}}$

- r이 최대인 B점의 합성응력에 의한 최대 전단응력 τ_R :

$$\tau_R = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2\cos\theta} \qquad (4 \cdot 42)$$

여기서 $\cos\theta = \dfrac{c}{2r_B}$

(3) T형 용접 이음

P_1 : 인장하중, P_2 : 용접선 방향의 전단하중

P_3 : 용접선에 수직한 전단하중

M_1 : 용접선 방향의 굽힘 모멘트

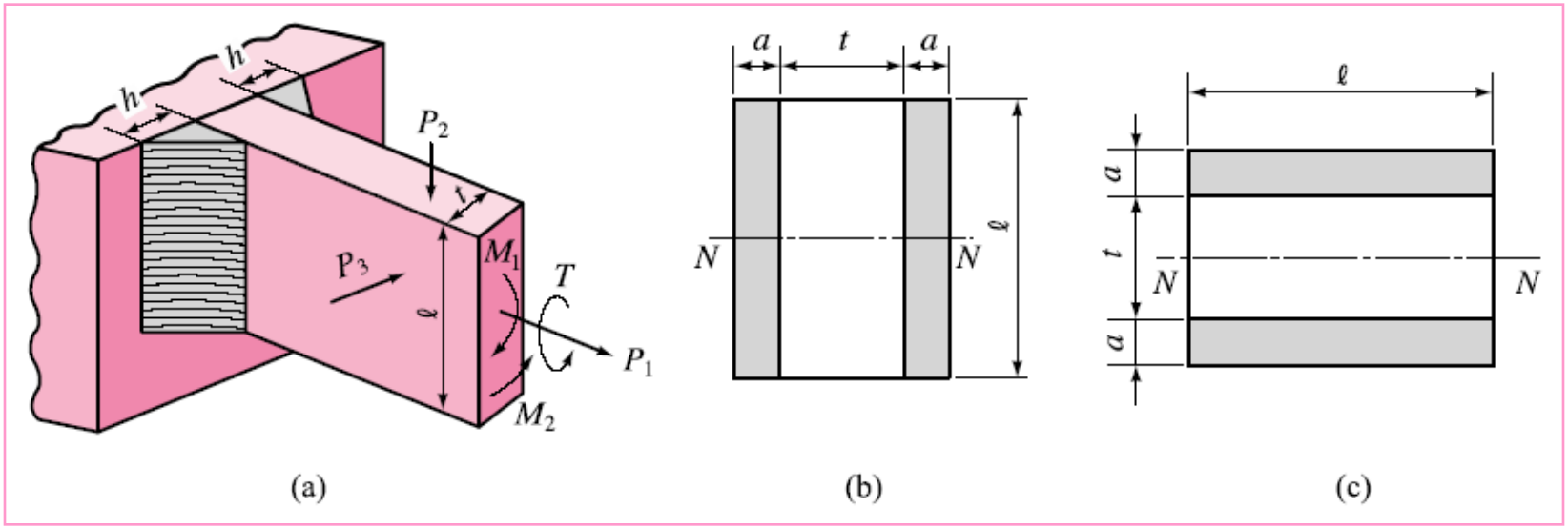
(P_2에 의한 굽힘 모멘트)

M_2 : 용접선에 수직한 굽힘 모멘트

(P_3에 의한 굽힘 모멘트)

- P_1이 작용(<그림 4 – 43(b)>)할 때 저항면은 $a \times \ell$, 용접부에 생기는 인장응력 σ_t는

$$P_1 = 2a\ell\sigma_t = 2 \times 0.707h\ell\sigma_t = 1.414h\ell\sigma_t \qquad (4 \cdot 43)$$



<그림 4-43> T 형 용접 이음의 작용하중

- 용접선의 방향(<그림 4 – 43(a)>)으로 전단하중 P_2, 또는 직각방향으로 P_3가 작용할 때 전단응력 τ는

$$P_2(\text{또는 } P_3) = 1.414h\ell\tau \qquad (4 \cdot 44)$$

- 굽힘 모멘트 M_1이 작용(<그림 4 – 43(b)>)할 때 용접부에 발생하는 최대 굽힘응력 σ_b는

$$Z_1 = 2 \times \frac{a\ell^2}{6} = \frac{0.707h\ell^2}{3}$$

$$\therefore\ M_1 = \sigma_b Z_1 = \frac{0.707h\ell^2}{3}\sigma_b = 0.236h\ell^2\sigma_b \qquad (4 \cdot 45)$$

- 용접선에 수직 방향(<그림 4 – 43(c)>)으로 굽힘 모멘트 M_2 작용

$$Z_2 = \frac{\ell}{6} \cdot \frac{(2a+t)^3 - t^3}{(2a+t)} = \frac{\ell}{6} \cdot \frac{(1.414h+t)^3 - t^3}{(1.414h+t)}$$

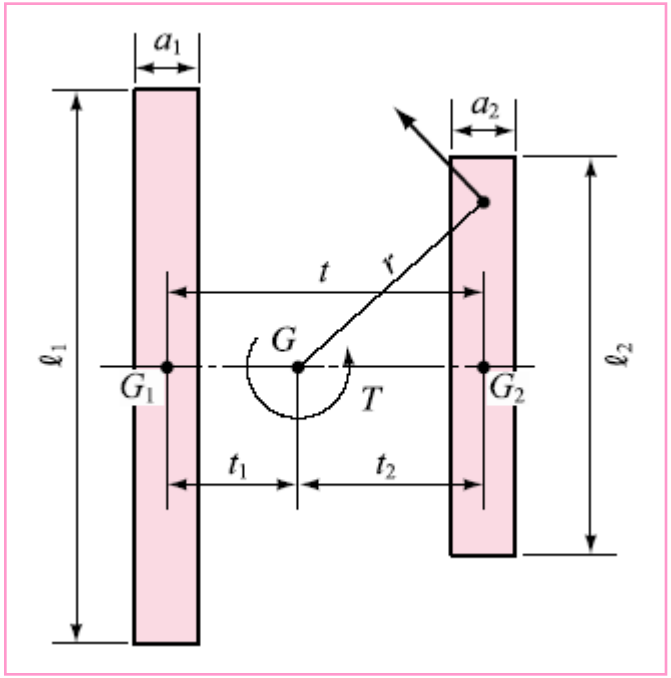
$$\therefore \; M_2 = \frac{(1.414h+t)^3 - t^3}{6(1.414h+t)} \ell \sigma_b \qquad (4 \cdot 46)$$

만일, $h = t$이면

$$M_2 = 0.902 \ell t^2 \sigma_b \qquad (4 \cdot 47)$$

- 좌우 비대칭인 전개도의 단면(<그림 4 – 44>)에 작용하는 T, τ와 극단면 2차 모멘트 I_p의 관계

$$\tau = \frac{T}{Z_p} = \frac{Tr}{I_p} \qquad (4 \cdot 48)$$



<그림 4-44> 용접부의 비대칭 단면

- 왼쪽 용접부 면적을 A_1, 도심 G에 관한 I_{p1} :

$$I_{p1} = A_1\left(\frac{\ell_1^{\,2}}{12} + t_1^{\,2}\right) \qquad (t_1 = \overline{GG_1}) \tag{4 • 49}$$

- 오른쪽 용접부에 대해서는

$$I_{p2} = A_2\left(\frac{\ell_2^{\,2}}{12} + t_2^{\,2}\right)$$

- 전체의 극단면 2차 모멘트 I_p :

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} \tag{4 • 50}$$

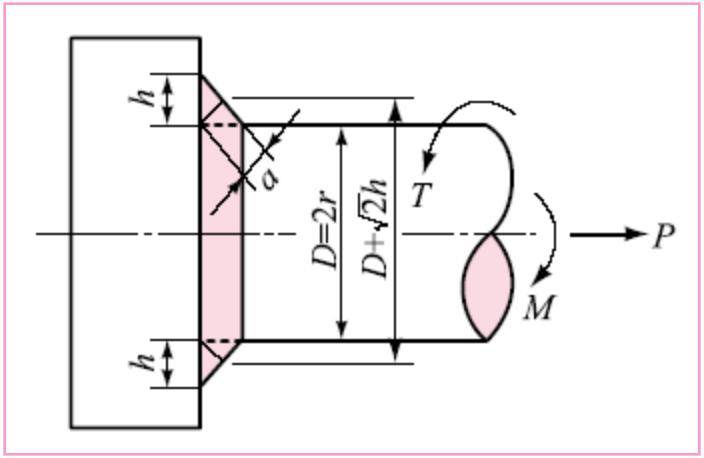
- 이와 같은 방법으로 I_p를 구하면 식 (4 • 48)에서 비틀림 모멘트 T에 의한 전단응력 τ가 계산된다.

(4) 원형 단면의 필릿 용접 이음

① 인장하중이 작용하는 경우

- 인장하중 P가 작용(<그림 4 – 45>)하면

$$P = \sigma_t A = \frac{\pi}{4}[(D+2a)^2 - D^2]\sigma_t = \frac{\pi}{4}[(D+\sqrt{2}h)^2 - D^2]\sigma_t \qquad (4 \cdot 51)$$



<그림 4-45> 원형단면의 필릿 용접 이음

② 굽힘 모멘트가 작용하는 경우

- 굽힘 모멘트 M이 작용(<그림 4-45>)하면

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = M \cdot \frac{y_{\max}}{I_{yy}} \qquad (4 \cdot 52)$$

$$I_{yy} = \frac{\pi}{64}\{(D+\sqrt{2}h)^4 - D^4\}, \quad y_{\max} = \frac{D+\sqrt{2}h}{2}$$

$$\therefore\ M = \frac{\pi}{64} \cdot \frac{2}{D+\sqrt{2}h}\{(D+\sqrt{2}h)^4 - D^4\}\sigma_b \qquad (4 \cdot 53)$$

③ 비틀림 모멘트가 작용하는 경우

- 비틀림 모멘트 T가 작용(<그림 4-45>)하면

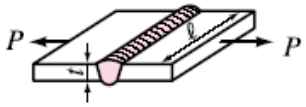
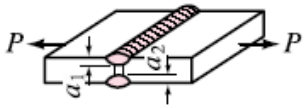
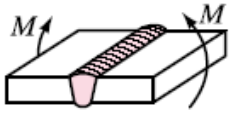
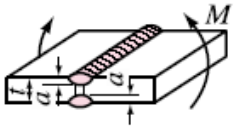
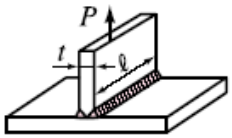
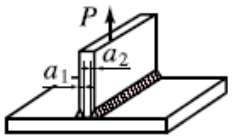
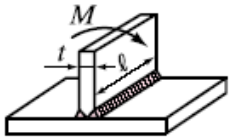
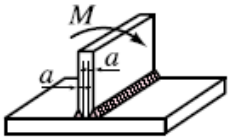
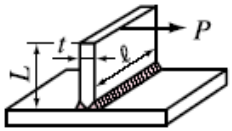
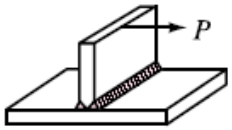
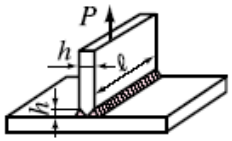
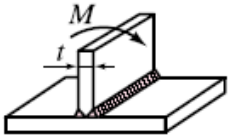
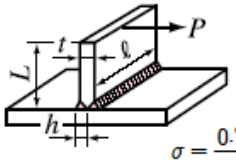
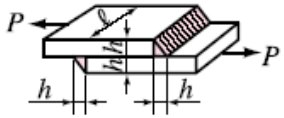
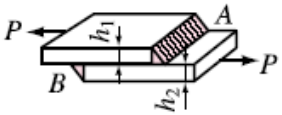
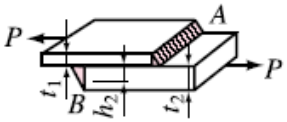
$$\tau = \frac{T}{Z_p} = T \cdot \frac{r_{\max}}{I_p}$$

여기서 $I_p = \frac{\pi}{32}\{(D+\sqrt{2}h)^4 - D^4\}$, $r_{\max} = \frac{D+\sqrt{2}h}{2}$

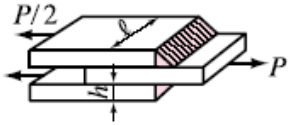
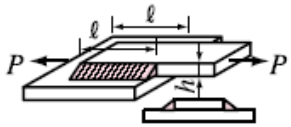
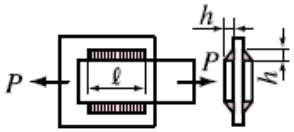
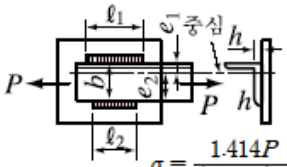
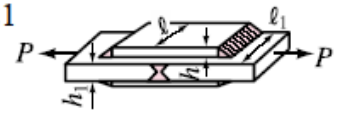
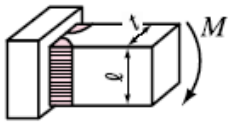
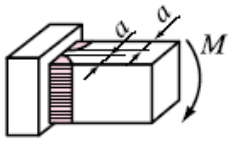
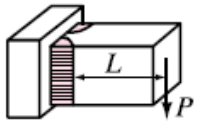
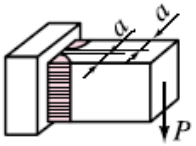
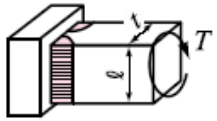
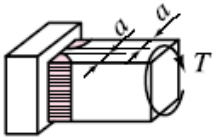
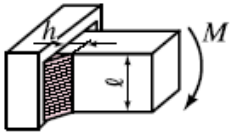
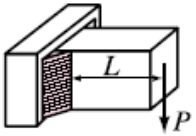
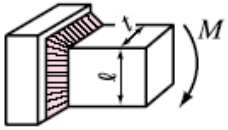
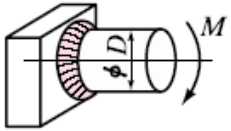
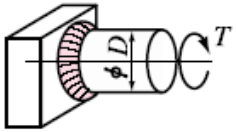
$$\therefore \frac{\pi}{32} \cdot \frac{2}{D+\sqrt{2}h}\{(D+\sqrt{2}h)^4 - D^4\}\tau \qquad (4 \cdot 54)$$

<표 4-19> 용접 이음에 대한 응력 계산식 – (1)

σ : 수직응력, σ_b : 굽힘응력, τ : 전단응력, P : 하중, M : 굽힘모멘트, T : 토크, L : 하중점의 거리, ℓ : 용접유효길이, h : 용접사이즈, a : 목두께, t : 판두께, e : 중심으로부터의 거리

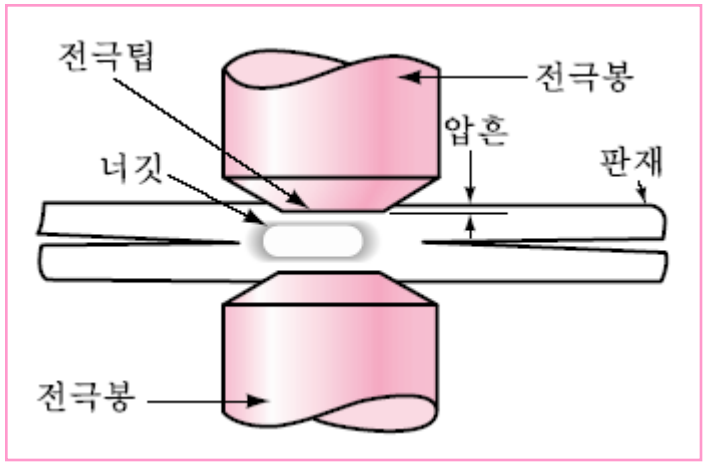
1  $\sigma = \dfrac{P}{\ell a}$, $(a = t)$	2  $\sigma = \dfrac{P}{\ell(a_1 + a_2)}$	3  $\sigma_b = \dfrac{6M}{\ell a^2}$	4  $\sigma_b = \dfrac{3tM}{\ell a(3t^2 - 6ta + 4a^2)}$
5  $\sigma = \dfrac{P}{\ell t}$	6  $\sigma = \dfrac{P}{\ell(a_1 + a_2)}$	7  $\sigma_b = \dfrac{6M}{\ell t^2}$	8  $\sigma_b = \dfrac{3tM}{\ell a(3t^2 - 6ta + 4a^2)}$
9  $\sigma_b = \dfrac{6PL}{\ell t^2}$, $\tau = \dfrac{P}{\ell t}$	10  $\sigma_b = \dfrac{3tPL}{\ell a(3t^2 - 6ta + 4a^2)}$, $\tau = \dfrac{P}{2\ell t}$	11  $\sigma = \dfrac{0.707P}{\ell h}$	12  $\sigma_b = \dfrac{1.414M}{\ell h(t + h)}$
13  $\sigma = \dfrac{0.707P}{\ell h}$, $\sigma_{max} = \dfrac{P}{\ell h(t+h)}\sqrt{2L^2 + \dfrac{(t+h)^2}{2}}$	14  $\sigma = \dfrac{0.707P}{\ell h}$, $(h = t)$	15  $\sigma = \dfrac{1.414P}{\ell(h_1 + h_2)} \begin{pmatrix} h_1 = t_1 \\ h_2 = t_2 \end{pmatrix}$	16  $\sigma_A = \dfrac{1.414P}{\ell(t_1 + t_2)}$, $\sigma_B = \dfrac{1.414Pt_2}{\ell h_2(t_1 + t_2)}$

<표 4-19> 용접 이음에 대한 응력 계산식 – (2)

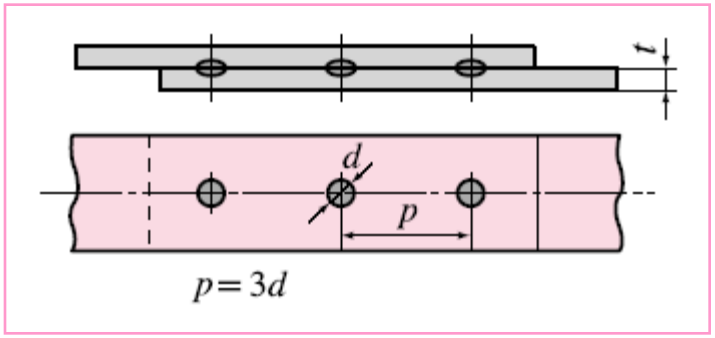
17  $\sigma = \dfrac{0.707P}{\ell h}$, $(h = t)$	18  $\sigma = \dfrac{0.707P}{\ell h}$, $(h = t)$	19  $\sigma = \dfrac{0.354P}{\ell h}$, $(h = t)$	20  $\sigma = \dfrac{1.414P}{(\ell_1+\ell_2)h}$, $\ell_1 = \dfrac{1.414Pe_2}{\sigma hb}$, $\ell_2 = \dfrac{1.414Pe_1}{\sigma hb}$
21  필릿 $\sigma = \dfrac{1.414P}{2\ell h + \ell_1 h_1}$ 버트 $\sigma = \dfrac{P}{2\ell h + \ell_1 h_1}$	22  $\sigma_b = \dfrac{6M}{\ell^2 t}$	23  $\sigma_b = \dfrac{3M}{\ell^2 a}$	24  $\sigma_b = \dfrac{6PL}{\ell^2 t}$, $\tau = \dfrac{P}{\ell t}$
25  $\sigma_b = \dfrac{3PL}{\ell^2 a}$, $\tau = \dfrac{P}{2\ell a}$	26  $\tau = \dfrac{T(3\ell + 1.8t)}{\ell^2 t^2}$	27  $\tau = \dfrac{T}{2(t-a)(\ell-a)a}$	28  $\sigma_b = \dfrac{4.24M}{\ell^2 h}$
29  $\sigma_b = \dfrac{4.24PL}{\ell^2 h}$, $\tau = \dfrac{0.707P}{\ell h}$	30  $\sigma_b = \dfrac{4.24M}{h\{(t^2 + 3\ell(t+h)\}}$	31  $\sigma_b = \dfrac{5.56M}{h\pi D^2}$	32  $\tau = \dfrac{2.83T}{h\pi D^2}$

(6) 점용접(spot weld) 이음

- 점용접은 주로 박판의 용접에 이용
- 접합하려는 두 박판을 겹친 후 전극봉을 통하여 박판 사이에 전류를 통한다.
- 전극봉 사이의 금속이 용융, 너깃(nugget) 형성
- 점용접은 자동차의 차체(車體), 항공기, 전자산업 등의 박판 용접에 널리 채택



<그림 4-46> 점용접



<그림 4-47> 점용접의 피치

- d : 너깃의 지름, t : 판재의 두께

$$\left.\begin{array}{l} t \leqq 3\ [\mathrm{mm}] \text{ 일 때 } d = 1.2t + 4\ [\mathrm{mm}] \\ t > 3\ [\mathrm{mm}] \text{ 일 때 } d = 1.5t + 4\ [\mathrm{mm}] \end{array}\right\} \qquad (4 \cdot 55)$$

- 용접 피치 : <그림 4 - 47>과 같이 2판 겹치기 이음에서는 $p = 3d$, 3판 겹치기 이음에서는 $p = 4d$

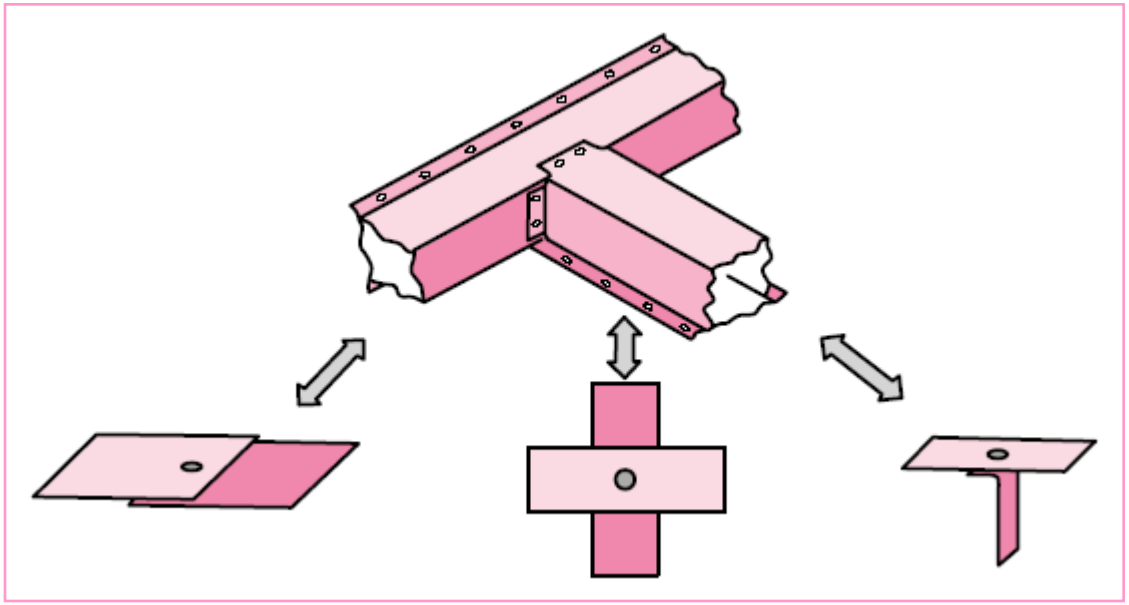
- 점용접의 전단응력을 τ라 하면 전단하중 P :

$$P = n\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)\tau \qquad (4 \cdot 56)$$

여기서 n : 용접점의 수

- 박스형 부재의 용접이음에 대한 강도

⇒ 단순겹치기, 십자형 및 T형 점용접으로 분해, 조합하는 응력해석 방법을 고려



<그림 4-48> 박스형 부재의 점용접

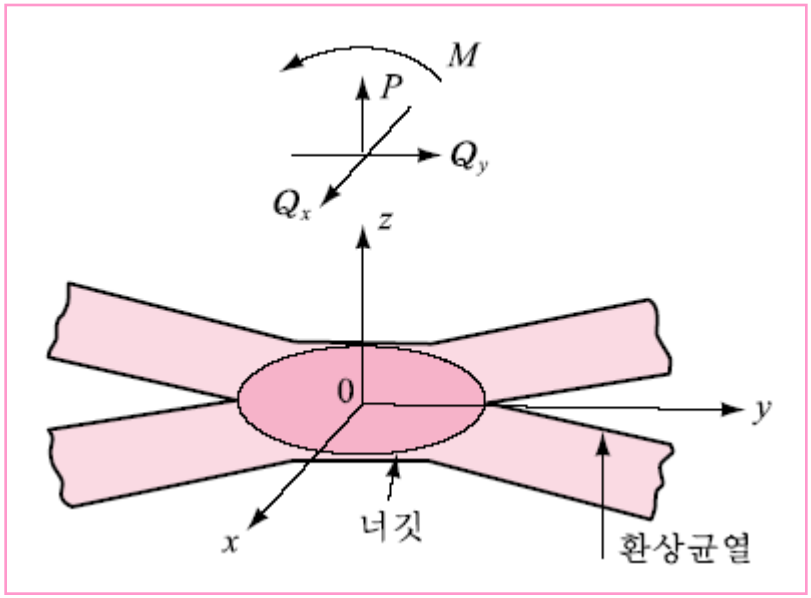
- 점용접에 대한 강도해석 ⇒ 너깃의 가장자리를 중심으로 용접이 되지 않은 박판 사이의 공간 부분을 환상(環狀) 균열로 취급, 파괴역학(fracture Mechanics)의 도입 연구

- 환상균열에 대한 균열의 파괴 모드와 하중, 모멘트 관계

  ① 모드 Ⅰ(열림 모드 : opening mode) : P, M

  ② 모드 Ⅱ(전단 모드 : shear mode) : Q_x

  ③ 모드 Ⅲ(찢겨짐 모드 : tearing mode) : Q_y



<그림 4-49> 점용접에 대한 환상균열 및 균열 모드

5. 용접이음의 효율

- 용접부의 급격한 가열 및 냉각 : 재료의 취성화(脆性化), 잔류응력의 존재 ⇒ 모재의 강도보다 낮다.
- 용접부의 파괴 가정 ⇒ 용접이음에 대한 효율 고려
- 용접이음의 효율 η : 이음의 형상계수 k_1, 용접계수 k_2로 표시

$$\eta = \frac{\text{용접부의 강도}}{\text{모재의 강도}} = k_1 \cdot k_2 \qquad (4 \cdot 57)$$

- k_1은 이음의 형식 및 하중의 종류 등에 따라 다르며, 맞대기 필릿 용접의 효율은 80 [%]로 한다.
- 정하중에 대한 형상계수 k_1은 <표 4－20>의 값을 선택

- 용접계수 k_2 : 공장용접
  ① 아래보기와 같은 양호한 용접인 경우 $k_2 = 1.0$
  ② 수평용접, 수직용접, 위보기 용접인 경우 $k_2 = 0.5$
- 현장 용접이음 효율은 공장 용접 경우의 80~90 [%]
- 용접계수 k_2는 용접품질에 따라 변화
  ① 현장 용접/공장 용접 : 90 [%]
  ② 위보기 용접/아래보기 용접 : 80 [%]
  ③ 수평보기 용접/아래보기 용접 : 90 [%]
  ④ 수직보기 용접/아래보기 용접 : 95 [%]

6. 용접 변형 및 잔류응력

(1) 용접 응력 및 변형

- 용접부는 가열 및 급랭으로 온도차가 생겨 팽창 또는 수축변형이 생기며, 용접 잔류응력이 발생
- 용접 잔류응력은 저온파괴의 원인, 구조물의 좌굴 강도(buckling strength), 또는 취성파괴 강도에 영향
- 용접 열응력 σ_h :

  δ_h : 용접열에 의한 변형량, ε : 열변형률

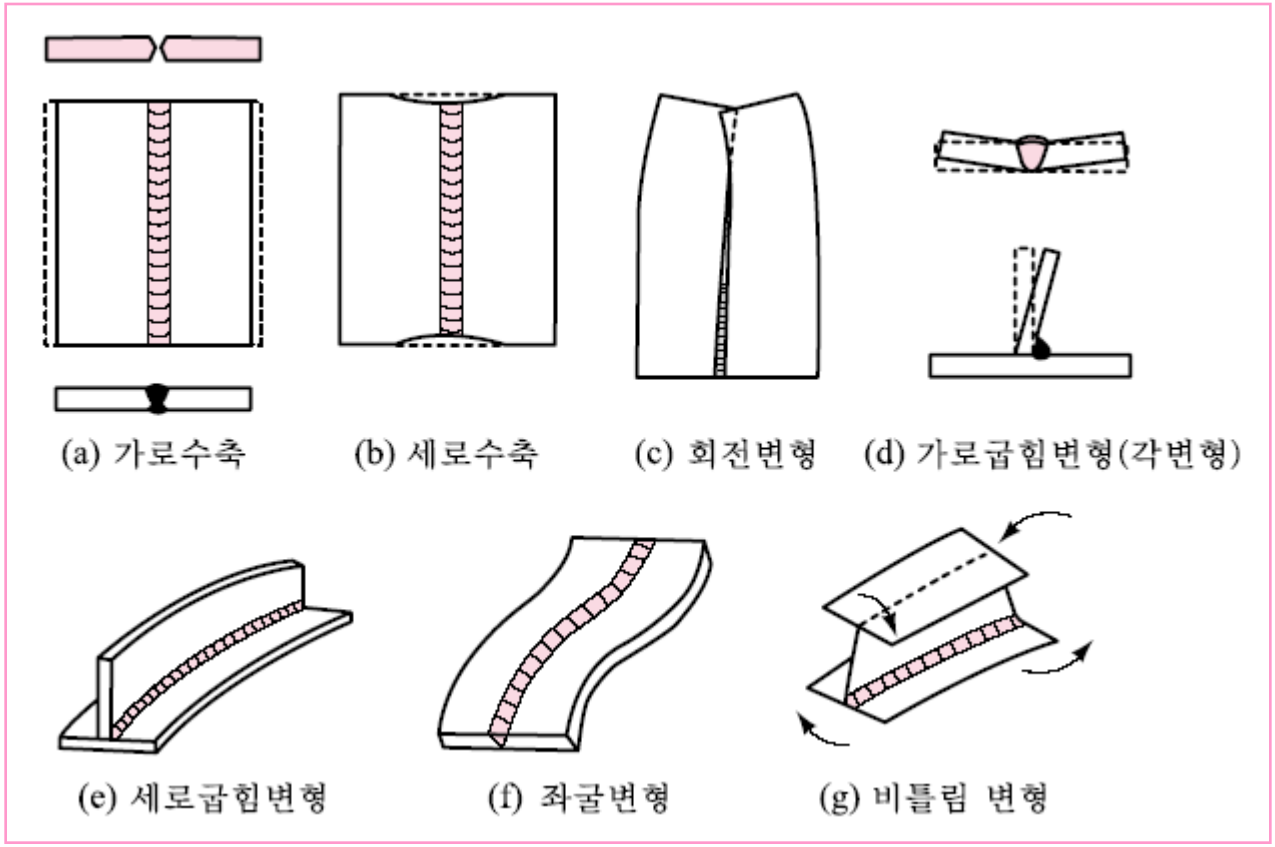
  E : 세로탄성계수, α : 선팽창계수,

  t_0 : 처음 온도[℃], t : 나중 온도[℃]

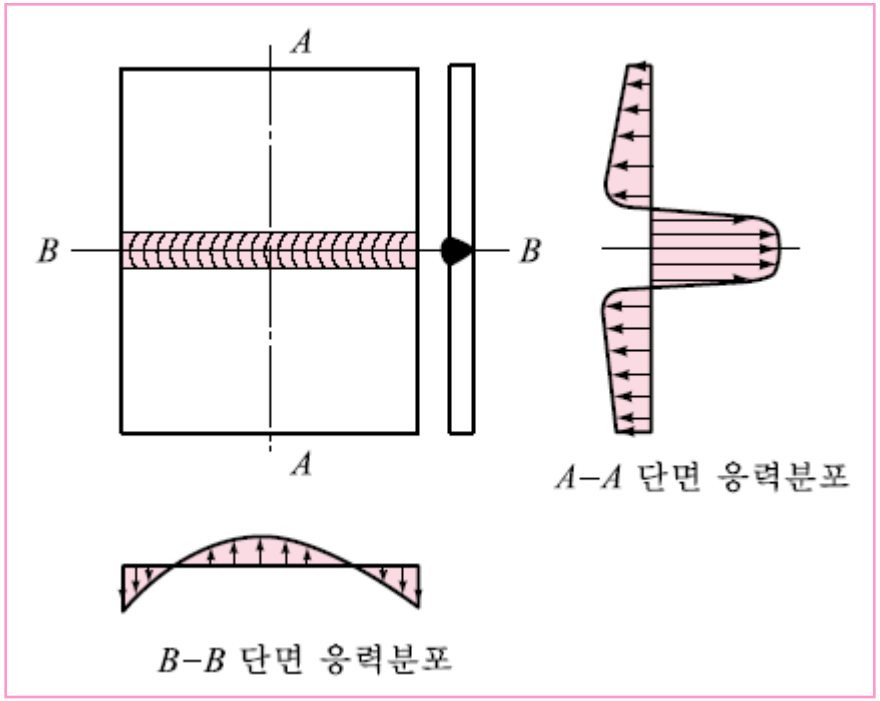
$$\delta_h = \alpha(t - t_0)\ell = \alpha \Delta T \ell \qquad (4 \cdot 58)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_h}{\ell} = \alpha(t - t_0) = \alpha \Delta T \qquad (4 \cdot 59)$$

$$\sigma_h = E\varepsilon = E\alpha(t - t_0) = E\alpha \Delta T \qquad (4 \cdot 60)$$



<그림 4-50> 용접 변형의 종류



<그림 4-51> 맞대기 이음에 대한 용접잔류응력의 분포

(2) 잔류응력의 경감 및 완화 대책

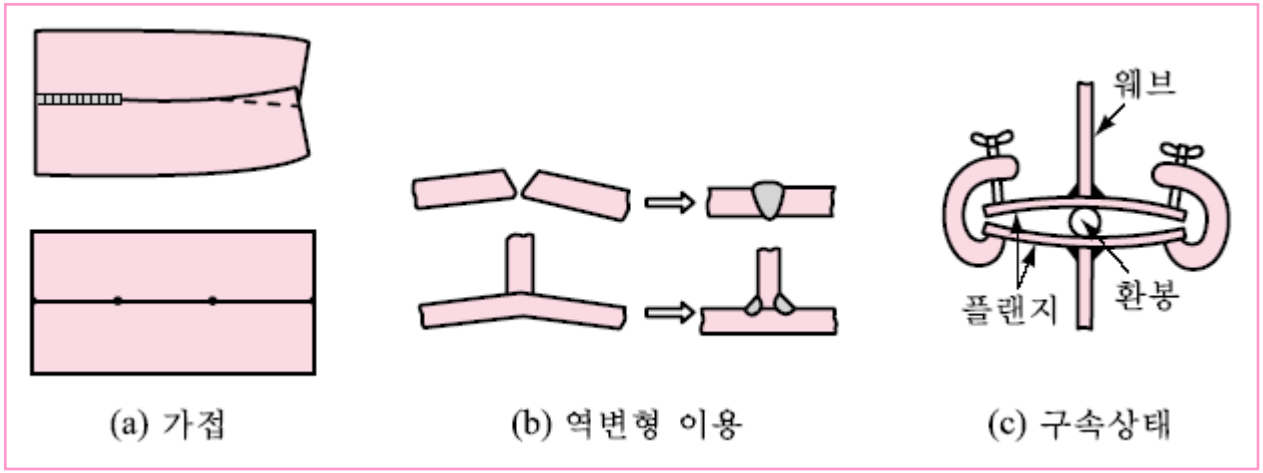
- 용접변형을 방지하기 위한 대책

① 용접길이는 짧게, 용접금속 중량은 적게 한다.

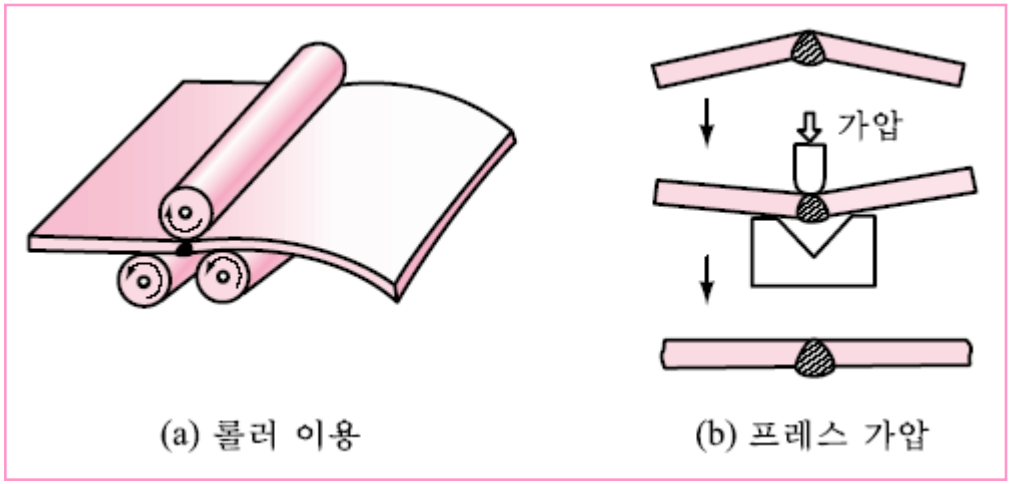
② 용착열이 적은 용접법의 채택이 요망된다.

③ 용접변형이 문제될 때는 구속을 크게 한다.

④ 잔류응력이 문제될 때는 구속을 적게 한다.



<그림 4-52> 용접변형의 방지 방법



<그림 4-53> 가압법에 의한 변형 교정

- 잔류응력을 완화시키기 위한 방법

① 응력제거를 위한 어닐링 처리

- 용접물을 가열로에 넣고 600~650[℃]로 일정시간 유지시킨 후 서서히 냉각
- 열영향부의 연성 증가, 용접금속의 수소제거 효과, 취성 및 피로강도 향상, 내식성의 향상, 사용중의 치수오차 방지에 유효
- 18-8 스테인리스강은 600~650[℃]로 가열하면 내식성을 저하시킬 우려가 있다.

② 저온응력 완화법 : 용접부를 600~650[℃]로 가열한 후 수냉시킨다.

③ 기계적 응력완화법 : 잔류응력의 발생 제품에 하중을 작용시켜 용접부를 약간 소성변형 시키면 어느 정도 잔류응력이 감소

④ 피닝(peening)법 : 용접부의 표면을 끝이 둥근 해머 등으로 연속해서 두드리면 잔류응력이 완화 ⇒ 유압, 자동장치 이용

예제 4-8

〈그림 4-34(a)〉와 같은 맞대기 용접 이음에서 허용인장응력 80 [MPa], 두께 12 [mm]의 강판을 용접길이 120 [mm], 용접 이음 효율 80 [%]로 맞대기 용접 이음을 할 때, 용접부가 견딜 수 있는 허용하중과 용접 목두께를 구하시오. 용접부의 허용인장응력은 70 [MPa]로 한다.

〈풀이〉 용접길이의 강판이 지탱할 수 있는 하중은

$$\sigma_t t\ell = 80 \times 12 \times 120 = 115200 \text{ [N]}$$

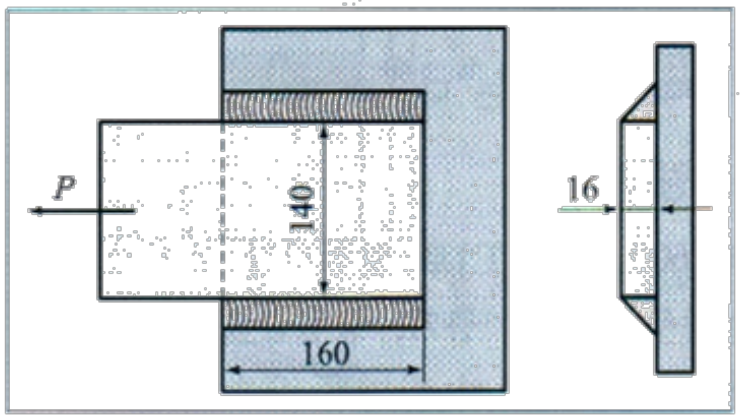
용접 이음 효율이 80 [%]이므로 용접부가 견딜 수 있는 하중은

$$P = 0.8 \times 115200 = 92160 \text{ [N]} = 92.16 \text{ [kN]}$$

식 (4·27)에서 목두께 t는

$$t = \frac{P}{\sigma_t \ell} = \frac{92160}{70 \times 120} = 11 \text{ [mm]}$$

예제 4-9 〈그림 4-53〉과 같은 옆면 필릿 용접이음에 작용시킬 수 있는 인장하중을 구하시오. 용접부의 허용전단응력은 50 [MPa]이다.

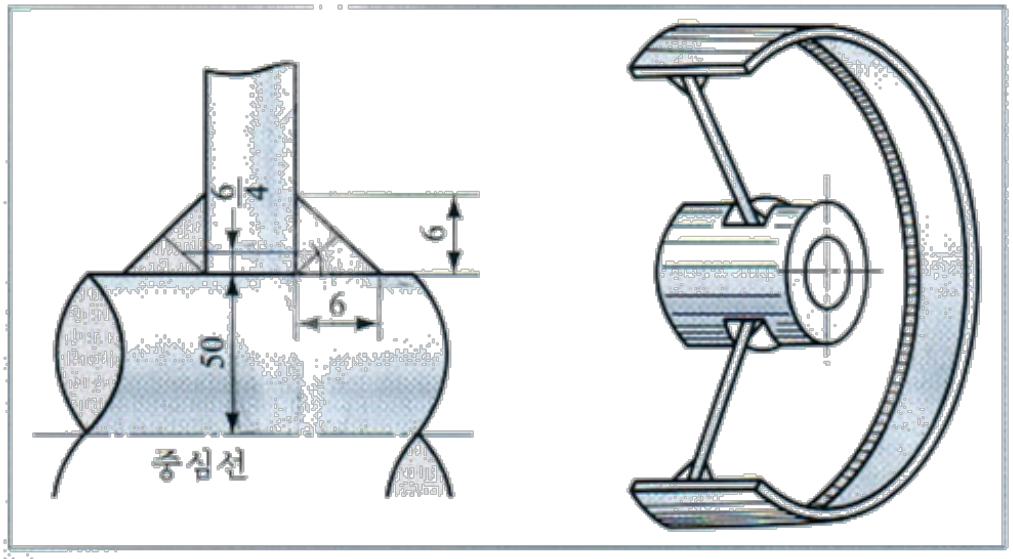


〈그림 4-53〉

〈풀이〉 식 (4 · 32)로부터

$$P = 2 \times 0.707 h \ell \tau_a = 2 \times 0.707 \times 16 \times 160 \times 50 = 180992 \text{ [N]} = 181 \text{ [kN]}$$

예제 4-10 〈그림 4-54〉와 같이 바깥지름 500 [mm], 보스지름 100 [mm]인 풀리가 용접사이즈 6 [mm]인 필릿 용접이음으로 되어 있다. 이 풀리가 1500 [rpm], 45 [PS]를 전달한다면 용접부의 전단응력을 구하시오.



〈그림 4-54〉

〈풀이〉 전달토크 T는 $T = 7023.5\dfrac{H}{N} = 7023.5 \times \dfrac{45}{1500} = 210.7\ [\mathrm{N \cdot m}] = 210700\ [\mathrm{N \cdot mm}]$

보스 목부분의 중심까지의 반지름 r은

$$r = \frac{100}{2} + \frac{6}{4} = 51.5 \text{ [mm]}$$

토크 전달로 용접부가 받는 힘은 림 부분보다 보스 부분이 훨씬 크다.

보스의 용접부가 전달하는 힘 P는

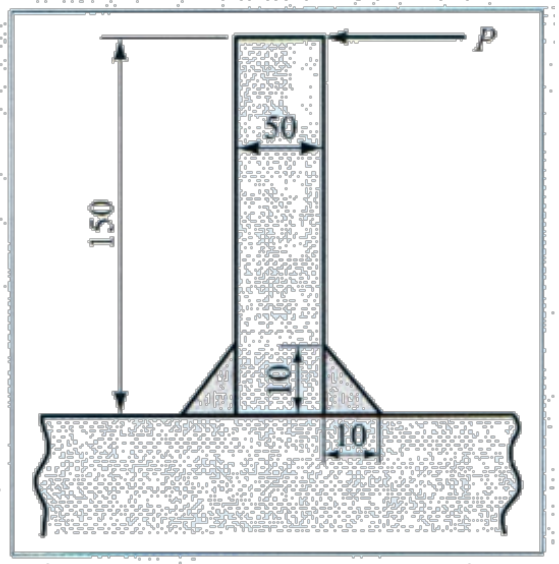
$$P = \frac{T}{r} = \frac{210.7 \times 10^3}{51.5} = 4091.3 \text{ [N]} = 4.1 \text{ [kN]}$$

전단응력 τ는

$$\tau = \frac{P}{2a\ell} = \frac{P}{2(0.707h)\ell} = \frac{4091.3}{0.707 \times 6 \times 2\pi \times 51.5 \times 2} = 1.49 \text{ [N/mm}^2\text{]} = 1.49 \text{ [MPa]}$$

예제 4-11

〈그림 4-55〉와 같은 필릿 용접이음에 10 [kN]의 하중이 작용할 때 용접부에 발생하는 굽힘응력 및 최대 전단응력은 얼마인가? 용접부의 유효길이는 양쪽이 각각 120 [mm]이고, 용접사이즈는 10 [mm]이다.



〈그림 4-55〉

〈풀이〉 - 용접부의 목두께 $a = 0.707h = 0.707 \times 10 = 7.07$ [mm]이고, 굽힘의 중립축에 대한 용접부의 단면 2차 모멘트 I는

$$I = \frac{b(h_2^3 - h_1^3)}{12} = \frac{120 \times [(50 + 2 \times 7.07)^3 - 50^3]}{12} = 1388680.9 \text{ [mm}^4\text{]}$$

단면계수 Z는

$$Z = \frac{I}{h_2/2} = \frac{2 \times 1388680.9}{64.14} = 43301.6 \text{ [mm}^3\text{]}$$

굽힘응력 σ_b는

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{P \cdot L}{Z} = \frac{10000 \times 150}{43301.6} = 34.64 \text{ [N/mm}^2\text{]} = 34.64 \text{ [MPa]}$$

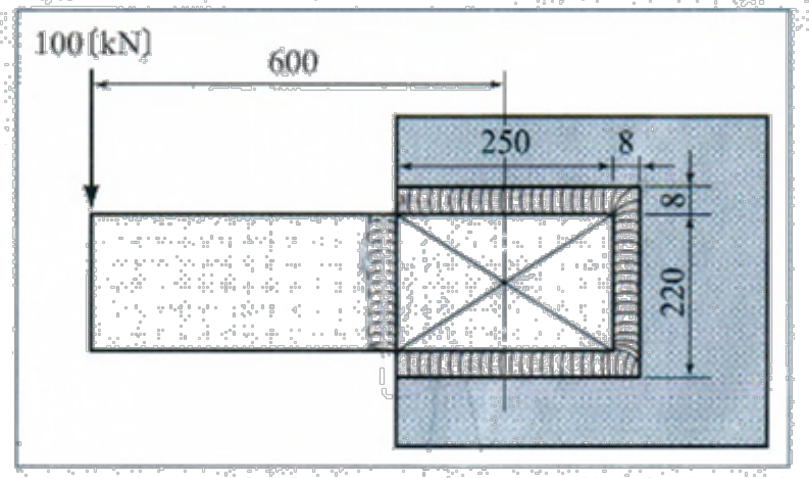
직접 전단응력 : $\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{2 \times 0.707h\ell} = \frac{10000}{2 \times 0.707 \times 10 \times 120} = 5.89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

최대 전단응력 : $\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} = \sqrt{\left(\frac{34.64}{2}\right)^2 + 5.89^2} = 18.29 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$= 18.29$ [MPa]

예제 4-12

〈그림 4-56〉과 같이 4곳의 측면 필릿 용접이음에 의한 구조물에 100 [kN]의 편심하중이 작용한다. 이 용접부에 발생하는 최대 전단응력을 구하시오.



〈그림 4-56〉

〈풀이〉 편심하중으로 인한 직접 전단응력 τ_1은 식 (4 · 38)로부터

$$\tau_1 = \frac{P}{A} = \frac{P}{0.707h\ell} = \frac{10000}{0.707 \times 8 \times 2 \times (250+220)} = 1.88\ [\mathrm{N/mm^2}]$$

비틀림 모멘트에 의한 최대 전단응력 τ_2는 식 (4 · 41)로부터

$$r_B = \sqrt{\frac{b^2+c^2}{4}} = \sqrt{\frac{250^2+220^2}{4}} = 166.5\ [\mathrm{mm}]$$

$$I_p = \frac{(b+c)^3}{6} \times 0.707h = \frac{(250+220)^3}{6} \times 0.707 \times 8 = 9.787 \times 10^7\ [\mathrm{mm^4}]$$

$$\tau_2 = \frac{PLr_B}{I_P} = \frac{10000 \times 600 \times 177}{9.787 \times 10^7} = 10.85\ [\mathrm{N/mm^2}]$$

용접부에 발생하는 최대 전단응력 τ_R은 τ_1과 τ_2의 합벡터가 된다.

τ_1과 τ_2가 이루는 각은 $\theta = 45°$이므로

$$\tau_R = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2\cos\theta} = \sqrt{1.88^2 + 10.85^2 + 2 \times 1.88 \times 10.85 \times \cos 45°}$$

$$= 12.25\ [\mathrm{N/mm^2}] = 12.25\ [\mathrm{MPa}]$$

4-3 ≫ 접착이음(Adhesive Joints)

1. 구조접착

- 접착(接着, adhesive bonding) : 접착제를 사용하는 접합방법
- 구조접착(構造接着, structural adhesive bonding) : 힘을 전달하는 접합부에 접착제를 사용하여 접착

<표 4-22> 접착법의 특징

특징의 분류	접착법의 특징
장 점	① 경량화가 가능 ② 비금속재료 · 이종재료끼리 접착가능 ③ 복잡한 형상이나 작은 부품, 얇은 것의 접착 가능 ④ 다량 동시접착이 가능하고, 자동화에 의한 생산성 향상 ⑤ 구멍 뚫기가 불필요하고, 응력집중의 배제 ⑥ 진동, 충격의 흡수작용 ⑦ 정적 · 피로강도의 증가 ⑧ 기밀, 수밀 이음 역할 ⑨ 열, 전기의 절연 접착이 가능하고, 전기적 부식이 없다. ⑩ 매끈한 접착면이 가능하다. ⑪ 용접에 비하여 저온에서 접착 작업이 가능 ⑫ 원가 절감
단 점	① 경화 시간이 길다. ② 고정 지그 및 가열 장치가 필요 ③ 표면 처리가 필요 ④ 접착제 선정의 어려움 ⑤ 접착제의 내구성이 약함 ⑥ 접착강도 평가의 어려움 ⑦ 열 저하의 제한성 ⑧ 접착강도의 신뢰성

2. 접착제

- 천연 접착제 : 천연재료에서 얻어지는 것 ⇒ 풀, 아교 등
- 인공 합성접착제 : 합성고분자를 주로 하는 인공 합성접착제

  ⇒ 열가소성 접착제, 열경화성 접착제, 고무계 접착제

<표 4-23> 접착제의 성분과 특성

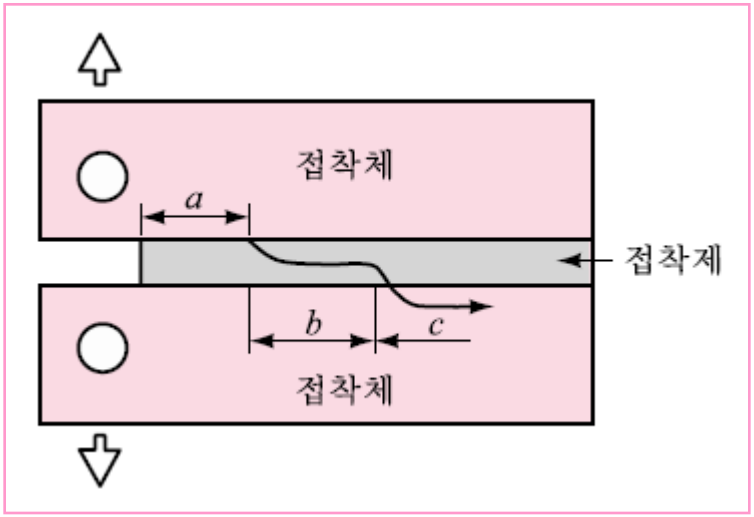
접 착 제	주 성 분	용액의 PH	고정조건과 온도	계면의 상태	용 도
유리와 수지	요소, 포름알데히드, 충전제는 전분 사용	약산성, 목재에도 영향	염화암모니움을 가하여 120℃에서 반응시킴	견고하지만, 내수성이 약간 낮음	2종류 합판, 파티클 보드
페놀수지	페놀, 포름알데히드	강알칼리, 계면에 영향	150℃에서 반응시킴	견고하고, 내수성이 크고 내구성도 우수	1종류 합판, 구조용 합판, 구조용 집성재
메라민수지	요소, 메라민, 포름알데히드	약산성	130℃에서 반응시킴	견고하고, 내수성이 있음	1종류 합판
레졸시놀	레졸민, 포름알데히드, 페놀과 공축합	중 성	파라 포름알데히드를 이용하여 상온경화	견고하고, 내수성이 큼	구조용 집성재
초산비닐수지	초산비닐, 폴리비닐알콜	약산성	용매확산에 의해 실온 경화	인성이 크지만, 내수성은 낮음	목재접착에 범용
수성비닐 우레탄	폴리비닐알콜, 폴리초산 비닐 SBR 라덱스	중 성	이소시아네이트 화합물로 상온경화	인성이 있고, 내수성도 우수	목재접착, 이종재료 접착
α－오레핀계 접착제	이소부틸렌·무수마레인산 공중합물	강알칼리, 또는 중성	경화제로 상온경화, 용매확산	견고하고, 인성도 있음	화장대의 접착, 무기재료의 접착
핫 멜트 접착제	에틸렌, 초산비닐 공중합물	중 성	고온에서 냉각 응고	젖음성이 좋을 때 접착력도 큼	단일판의 측면접착 등에 널리 이용
에폭시수지	에피크로히도린 비스페놀류	중 성	아민, 산무수물에서 상온경화	강인성이고, 내기후성, 내열성	이종재료의 접착 등에 널리 이용
고무계 접착제	합성고무	중 성	용매확산에 의해 상온경화	끈끈한 접착	이종재료의 접착

3. 접착강도

- 접착강도(接着强度, bond strength) : 접착부품에 기계적 외력을 작용시켰을 때 파괴에 대한 저항력
- 접착강도 ⇒ 접착체(adherend), 접착제(adhesive)의 계면(interface) 결합력으로써 표시
- 접착이음의 파괴 ⇒ 계면파괴(界面破壞, interface fracture)
  응집파괴(凝集破壞, cohesive fracture)
  접착체파괴(接着體破壞, adherend fracture)

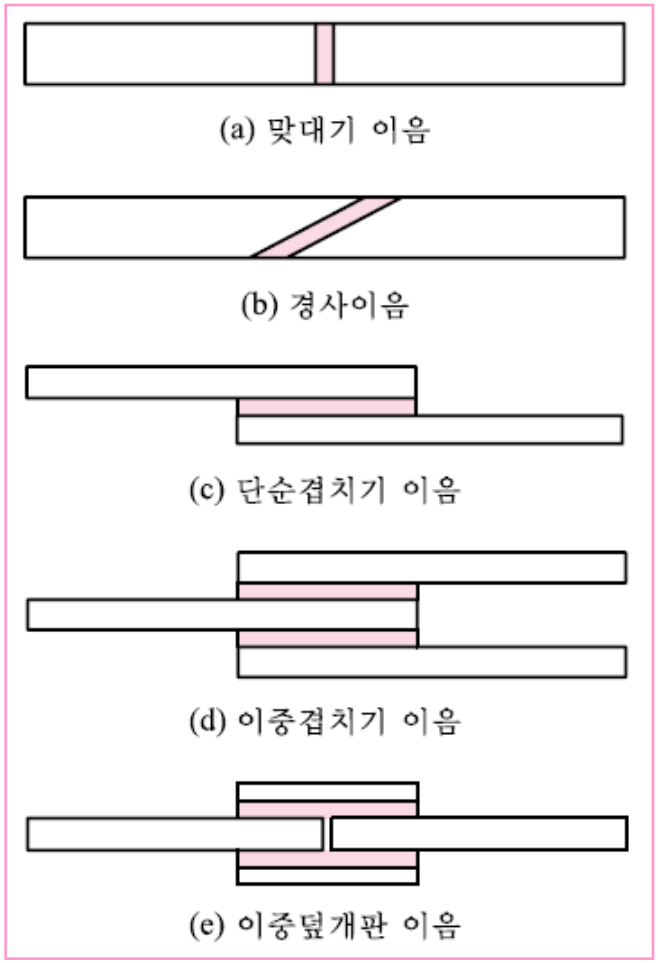
<표 4-24> 접착강도에 영향을 미치는 인자

접착강도의 영향인자		
역학적인자	재료인자	공정인자
이음형식 접착부의 형상 판두께, 판폭 부하방식 제어방식 응 력 비 접착층의 두께 파괴기구	접착체의 재질 접착면의 거칠기 접착면의 표면처리	접착제의 혼합비 접착압력 경화방식 경화온도 경화시간 경화후 처리



<그림 4-58> 접착부의 파괴형태

4. 접착이음의 종류



<그림 4-59> 접착이음의 기본형식

5. 접착이음의 응력해석

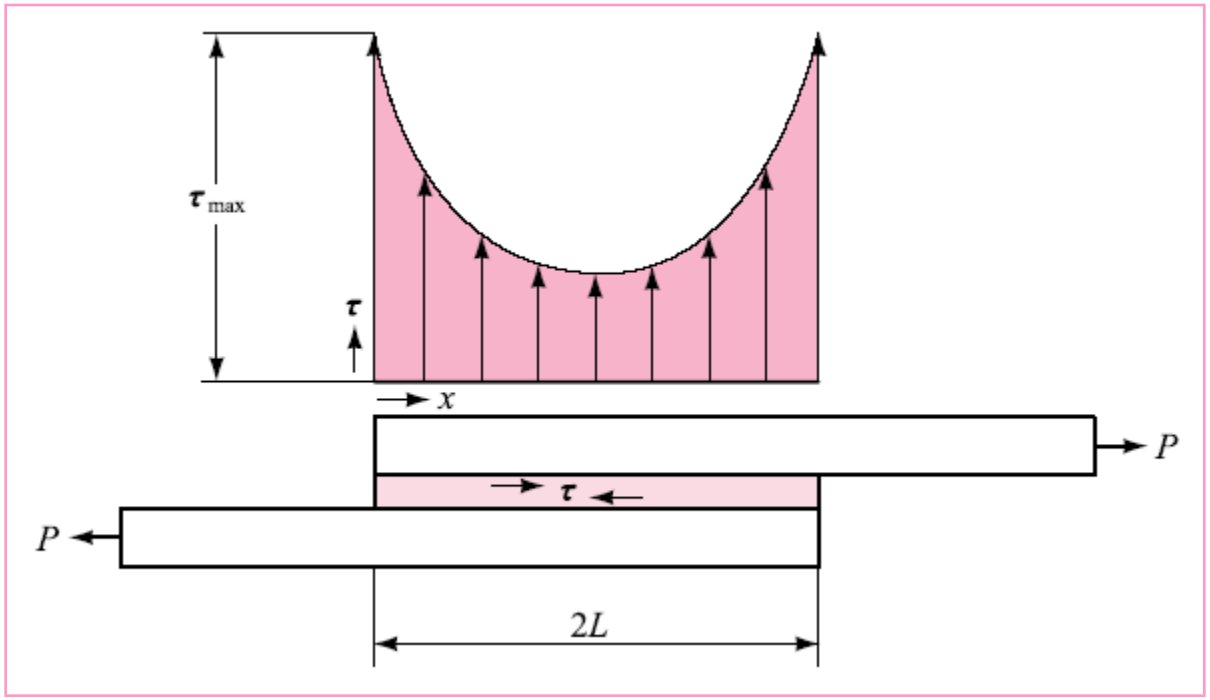
- 접착체와 접착제에 대한 두께, 물성치 및 역학적 성질의 현저한 차이
- 접착 계면은 기하학적 형상과 물성치에 불연속부가 존재하므로 응력의 특이성이 발생
- 응력 특이성을 충분히 파악하기 어렵다.
- 컴퓨터의 발달로 각종 접착이음의 응력분포 상태의 파악이 가능

- 평균전단응력 τ_m :

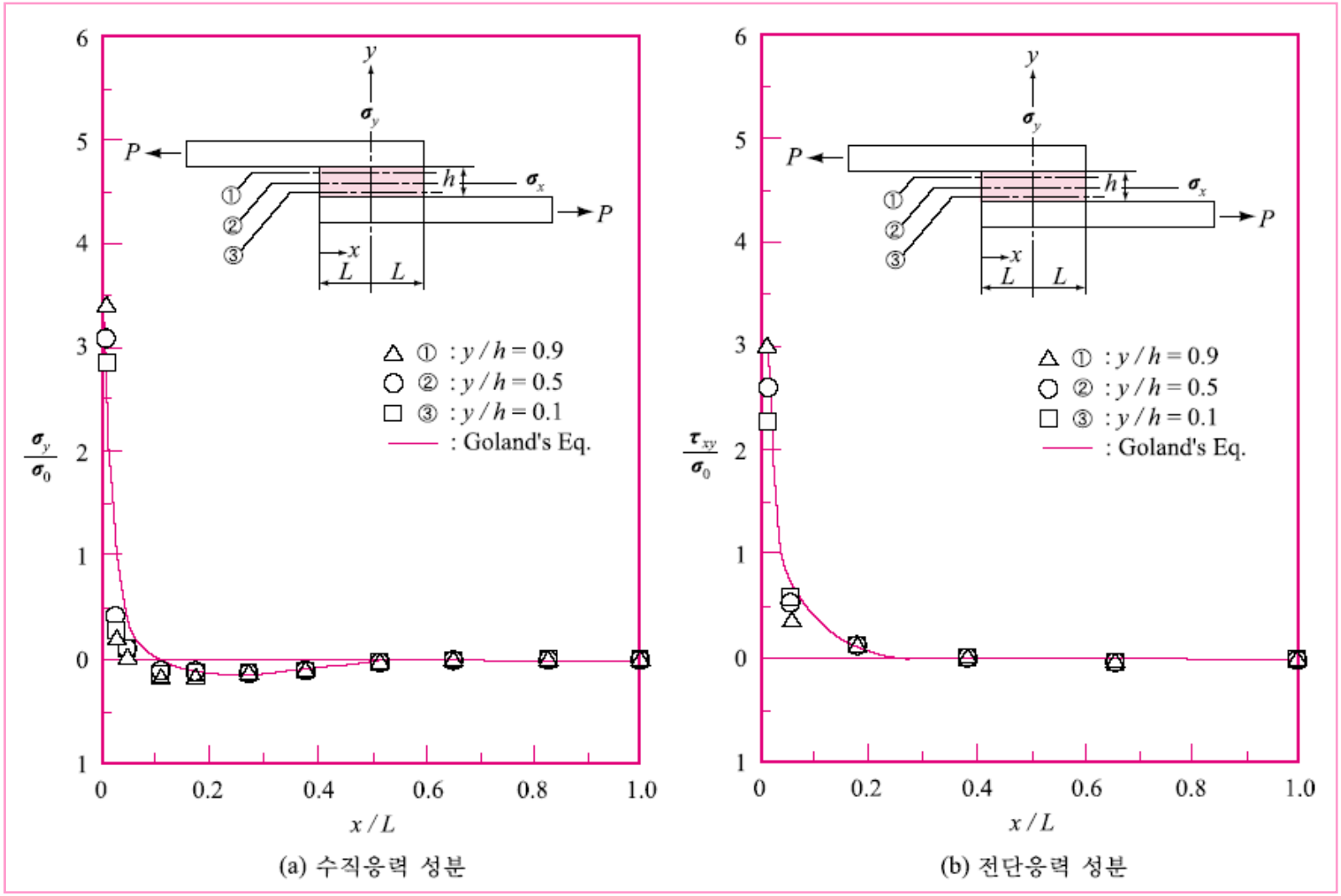
$$\tau_m = \frac{P}{A_s} = \frac{P}{b(2L)} = \frac{P}{2bL} \qquad (4 \cdot 61)$$

P : 작용하중, $2L$: 접착 겹치기 길이, b : 접착폭,

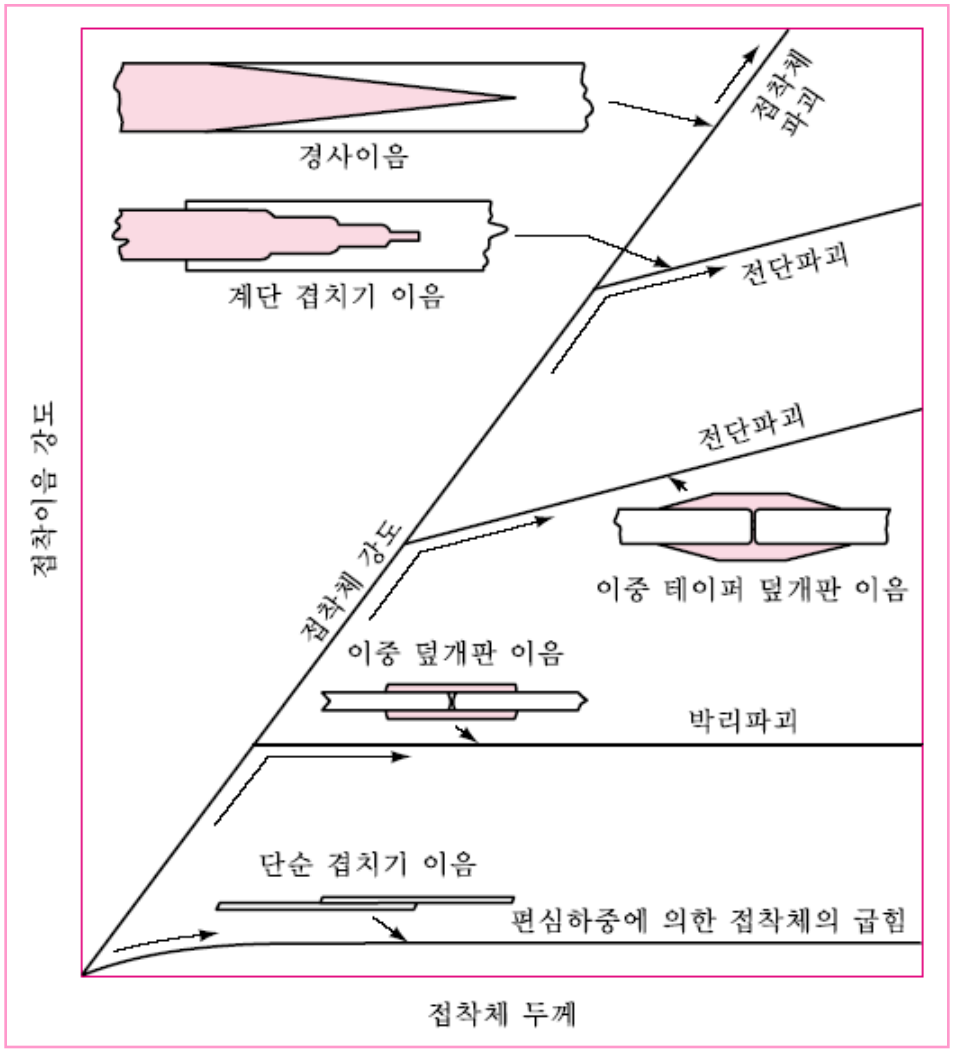
τ_m : 평균전단응력, $2L$: 접착 겹치기 길이, b : 접착폭이다.



<그림 4-60> 단순 겹치기 접착이음에 대한 이론 응력분포

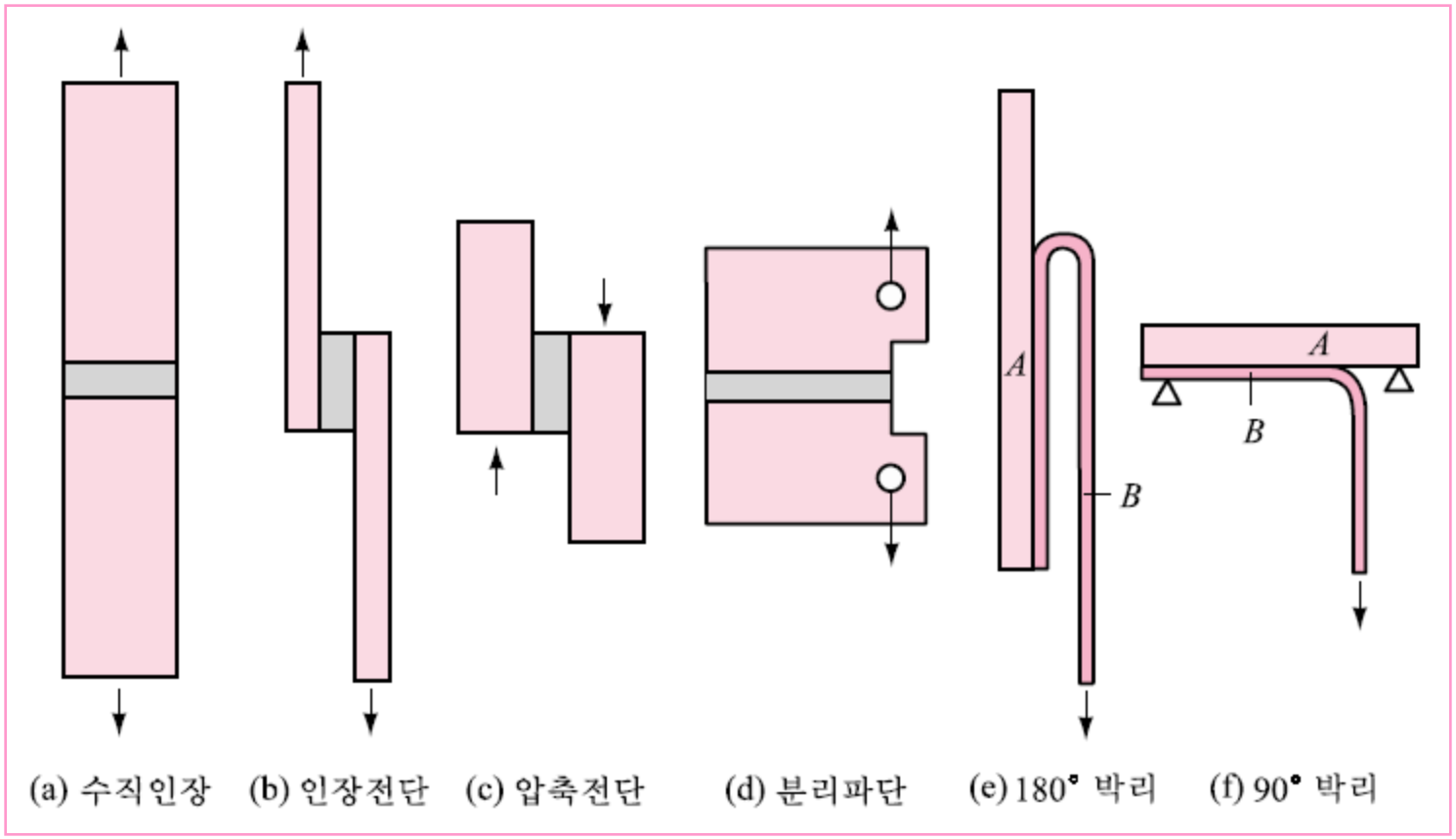


<그림 4-61> 단순겹치기 접착이음에 대한 유한요소 응력해석 결과



<그림 4-62> 접착체 두께에 따른 각종 접착이음의 강도

6. 접착강도 시험법



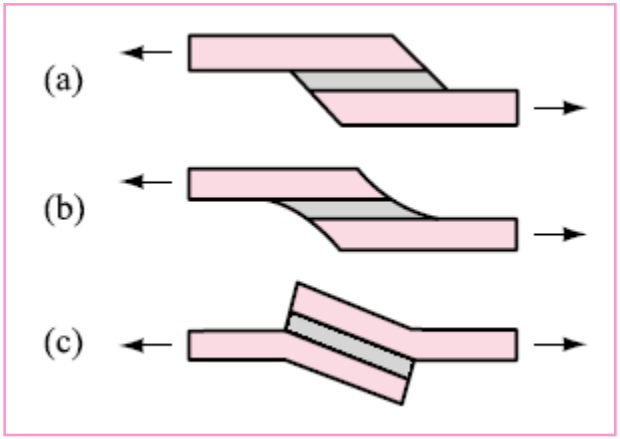
<그림 4-63> 각종 접착강도 시험편

◎ 각종 접착강도의 측정용 시험편의 특징

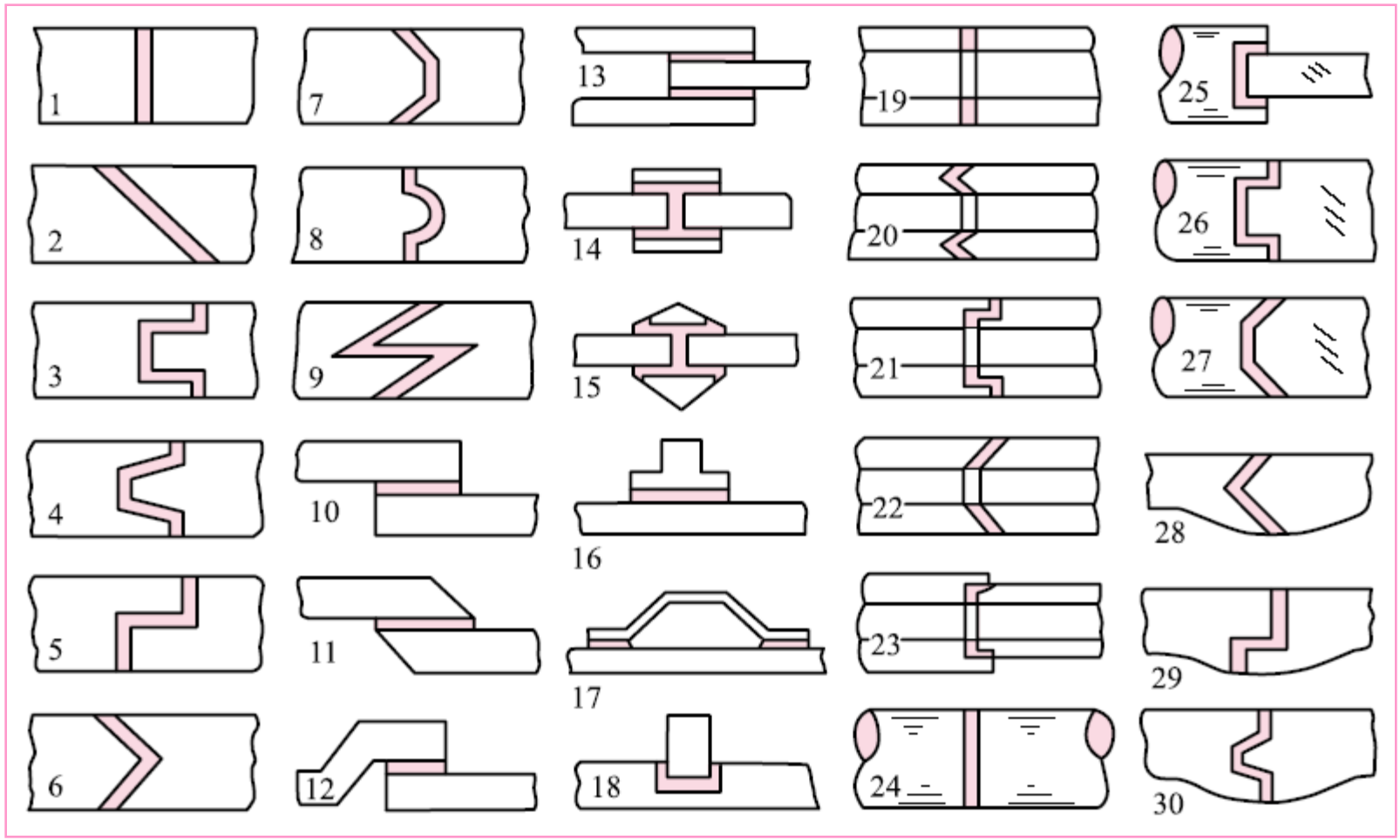
- <그림 4-63(a)>
  - 접착층에 대한 두께의 조절이 곤란
  - 시험편의 중심이 잘 맞지 않고 조금만 기울어지더라도 파손의 위험이 크다.
- <그림 4-63(b)>
  - 제작 및 시험이 용이, 가장 많이 사용
- <그림 4-63(c)>
  - 압축전단 시험편은 인장전단의 경우와 동일한 특성
  - 접착체는 어느 정도의 두께가 필요
  - 목재, 또는 콘크리트 등에 적합한 시험방법
- <그림 4-63(d)>
  - 접착체의 가공이 곤란하여 별로 사용하지 않는다.
  - 응력집중에 의해 균열이 진전하여, 파괴된다.
- <그림 4-63(e), (f)>
  - 테이프류 또는 연질(軟質) 접착체의 강도평가에 적합
  - 서서히 파괴가 진행된다.
  - 접착체가 잘 휘어지지 않는 경우 박리각은 90°~180°

7. 접착이음의 설계

- 인장응력의 감소 및 전단응력의 증대와 접착면적의 증가
- 접착계면의 응력특이성의 감소시켜 응력집중 완화

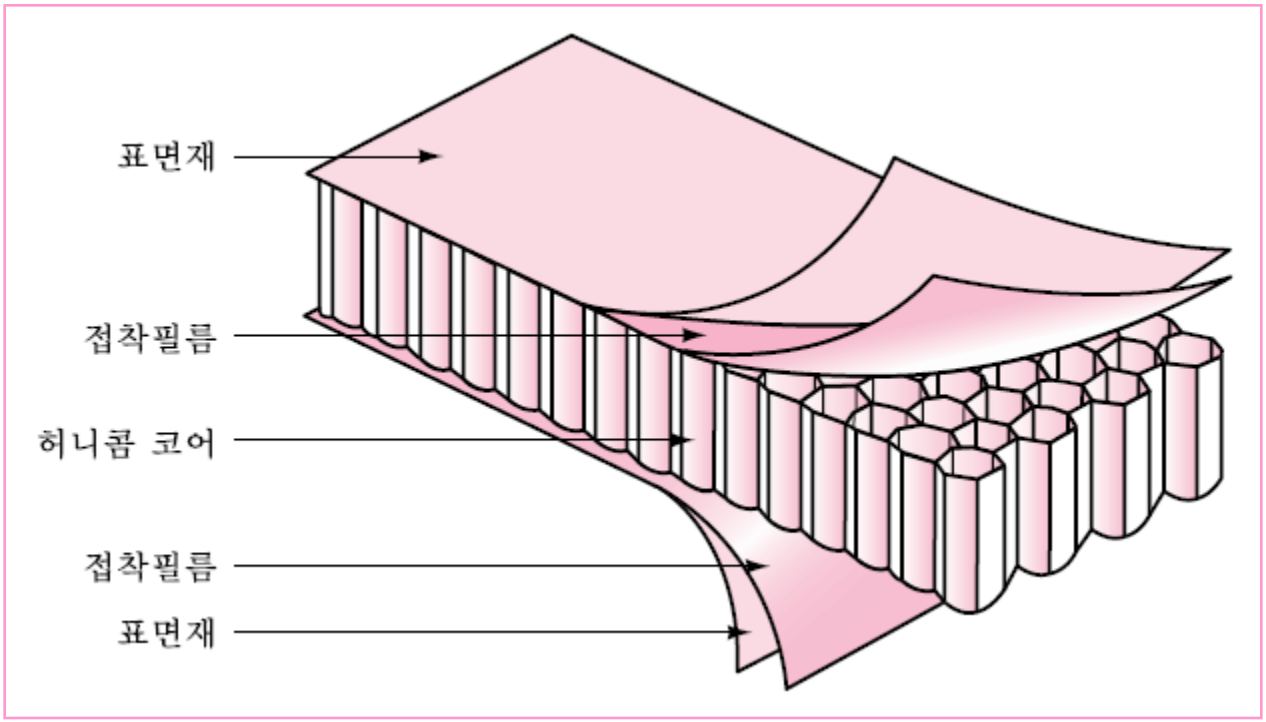


<그림 4-64> 접착이음의 응력 완화



<그림 4-65> 접착이음의 각종 설계 형상

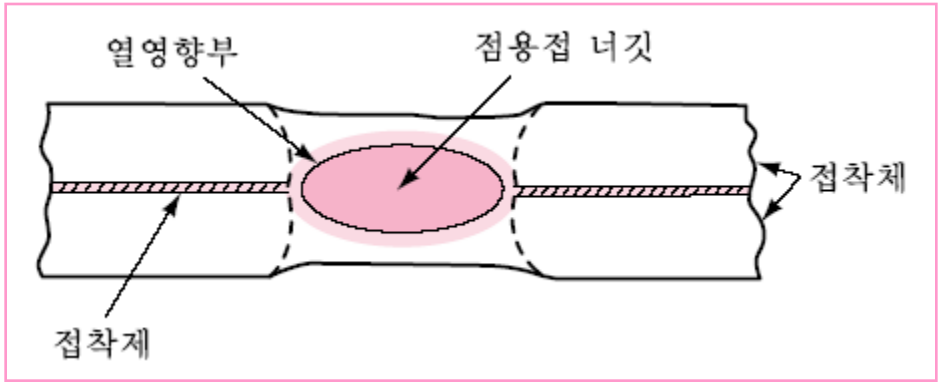
- 허니콤 샌드위치(honeycomb sandwich) 구조 :
  - 접착의 응용 방법
  - 경량화 가능
  - 충격 작용 부분, 특히 항공기 등에 널리 채택



<그림 4-66> 허니콤 샌드위치 구조

8. 웰드·본드(weld-bond) 접합법

접착의 신뢰성 검증 자료가 불충분하므로 접착과 스폿용접 또는 프로젝션 용접 등과 병행한 접합 방법



<그림 4-67> 웰드·본드 접합법

(1) 접착공정의 합리화

① 접착공정의 지그 장착 시간과 수고를 스폿용접으로 대체

② 접착제의 경화 공정을 개선

(2) 접착특성의 개선

접착의 결점인 박리강도, 충격강도, 고온 접착강도, 내크리프성, 하중 작용 상태에서 내환경성 등을 스폿용접과 병행, 성능개선

(3) 스폿용접 특성의 개선

① 알루미늄 합금, 박판 강판, 스테인리스강판 등의 접합 강도 향상

② 스폿용접의 응력집중 완화, 피로특성 향상

Chapter 05 축

자료제공: 학진북스-김남용저

5-1 ≫ 축과 그 종류

- 축(軸, shaft) ⇒ 베어링(bearing)으로 지지, 하중을 받으면서 회전에 의해 동력 전달이 목적인 기계요소

1. 축의 용도에 의한 분류

(1) 차축(axle shaft)

- 정지차축(stationary shaft) : 바퀴는 회전, 축은 고정되어 회전체를 지지하며 축은 회전하지 않는 축 ⇒ 차량용 차축
- 회전차축(rotating shaft) : 차륜과 함께 차축도 회전하는 축

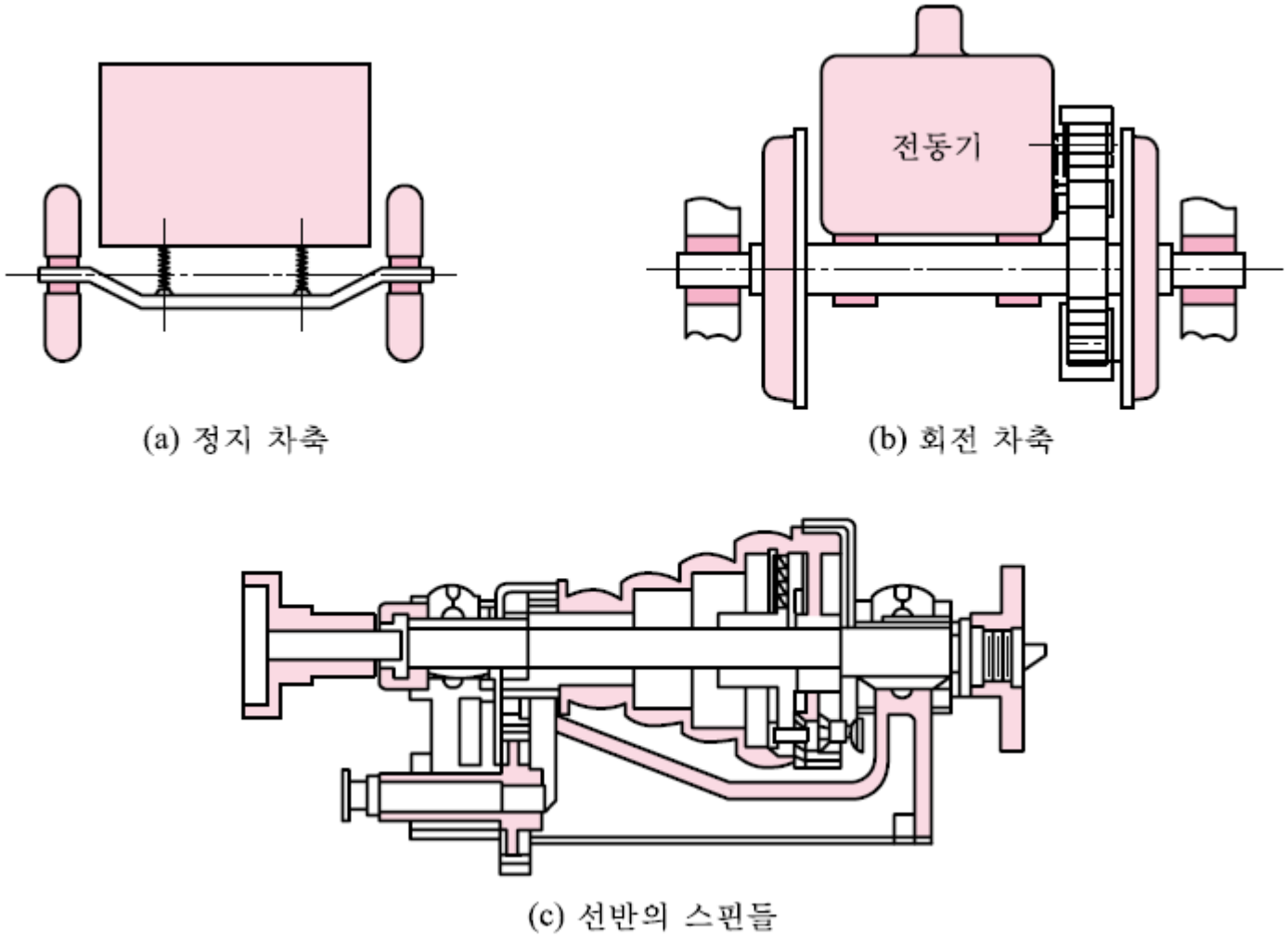
⇒ 철도차량용 차축

(2) 전동축(transmission shaft)

- 축의 회전에 의해 동력을 전달하는 축 ⇒ 비틀림 모멘트가 작용
- 일반 공장용 축, 프로펠러축(propeller shaft)

(3) 스핀들(spindle)

- 전동축의 특수한 것으로서 축의 지름에 비해 길이가 짧은 축
- 형상과 치수가 정밀하고 변형량이 극히 작아야 한다.
- 비틀림과 굽힘을 동시에 받는다.
- 공작기계의 주축 및 터빈 축 등이 있다.



(a) 정지 차축

(b) 회전 차축

(c) 선반의 스핀들

<그림 5-1> 축의 종류

2. 축의 형상에 의한 분류

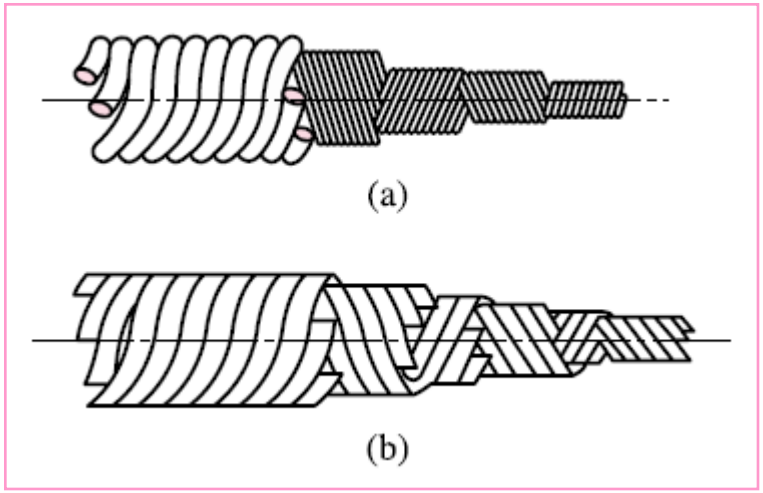
(1) 직선축(straight shaft)

(2) 크랭크축(crank shaft)

- 왕복운동과 회전운동의 상호변환에 사용하는 축
- 피스톤형 내연기관, 왕복압축기의 축

(3) 유연성축(flexible shaft)

- 전동축에 큰 휨(deflection)을 주어서 축의 방향을 자유롭게 바꾸거나 충격을 완화시키기 위한 축
- 비틀림 강도가 매우 크고, 굽힘 강도가 극히 작은 축으로서 축의 방향이 변하더라도 작은 회전 토크의 전달 가능
- 철사를 4~10겹으로 꼬아서, 그 자신이 자유롭게 휘어질 수 있는 코일형과 소형의 커플링, 또는 단축원통을 수많이 연결하여 축 전체가 자유로이 휘어질 수 있도록 한 만능 이음형
- 회전계의 구동축, 그라인더의 숫돌을 임의의 장소에서 구동하는 경우와 같이 전동축에 유연성을 준 것



<그림 5-2> 코일형 유연성축

3. 작용하중에 의한 분류

- 축에 작용하는 하중 : 굽힘을 받는 축, 비틀림을 받는 축, 굽힘, 비틀림, 인장, 압축 등의 하중을 동시에 2종류 이상 받는 축
- 중실축(中實軸, solid shaft), 중공축(中空軸, hollow shaft), 균일 단면축, 테이퍼축(taper shaft), 단붙이축(段軸, stepped shaft) 등

5-2 ≫ 축의 재료

- 인장강도가 낮고, 연성 풍부한 0.1~0.4%C 탄소강, 저합금강
- 고하중 및 고회전수의 축에는 Ni강, Ni-Cr강, Cr-Mo강 등
- 보통 크기의 축은 인발강이나 열간압연강이 사용
- 지름이 100[mm] 이상이면 단조에 의해 소재 제작
- 공장용 전동축, 저속 회전용 ⇒ 탄소강의 냉간 인발봉을 필요에 따라 표면경화시켜 사용한다.
- 베어링 지지의 저널(journal)부 내마모성 필요
  ⇒ 고주파 경화, 또는 침탄처리한 표면 경화강 사용

<표 5-1> 축 재료의 성질 및 용도

재 료	KS 번호	기 호	용 도	인장강도 [N/mm^2]
기계구조용 탄소강	KS D 3752	SM 10C~SM 25C	소형축, 모터축	320~440
		SM 35C~SM 40C	차축, 일반축	510~610
		SM 45C	크랭크축, 일반축	570~690
		SM 15CK	캠축, 피스톤핀	490 이상
크롬강	KS D 3867	SCr 415, 420	캠축, 스플라인축	740~1080
		SCr 430, 435, 440, 445	중형 일반축, 대형 일반축	
니켈크롬강		SNC 236, 415	소형축, 피스톤핀	740~930
		SNC 631, 815, 836	크랭크축, 캠축, 추진축, 일반축	
니켈크롬 몰리브덴강		SNCM 220, 240	소형축, 중형축	840~1080
		SNCM 415, 420	일반축	
		SNCM 431, 439, 447, 616, 625, 630, 815	크랭크축, 대형축, 피스톤핀	
크롬 몰리브덴강		SCM 415, 418	피스톤핀	840~1030
		SCM 420, 421	일반축, 피스톤핀	
		SCM 430, 432, 435, 440	크랭크축, 차축, 각종축	
		SCM 445, 822	대형축	

5-3 ≫ 축 설계의 고려사항

1. 강 도(strength)
2. 강 성(rigidity, stiffness)
   (1) 굽힘 변형
   (2) 비틀림 변형
3. 진 동(vibration)
4. 열응력(thermal stress)
5. 부 식(corrosion)

5-4 ≫ 축의 강도 설계

1. 정하중을 받는 축

(1) 굽힘만 작용하는 축

$$M = \sigma_b \cdot Z, \quad \sigma_b = \frac{M}{Z} \qquad (5 \cdot 1)$$

① 중실축의 경우

- 단면계수 : $Z = \dfrac{\pi d^3}{32}$

$$M = \sigma_b \cdot Z = \frac{\pi d^3}{32}\sigma_b$$

▪ 축의 지름 :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi\sigma_a}} \qquad (5 \cdot 2)$$

σ_a : 축의 허용 굽힘응력

② 중공축의 경우

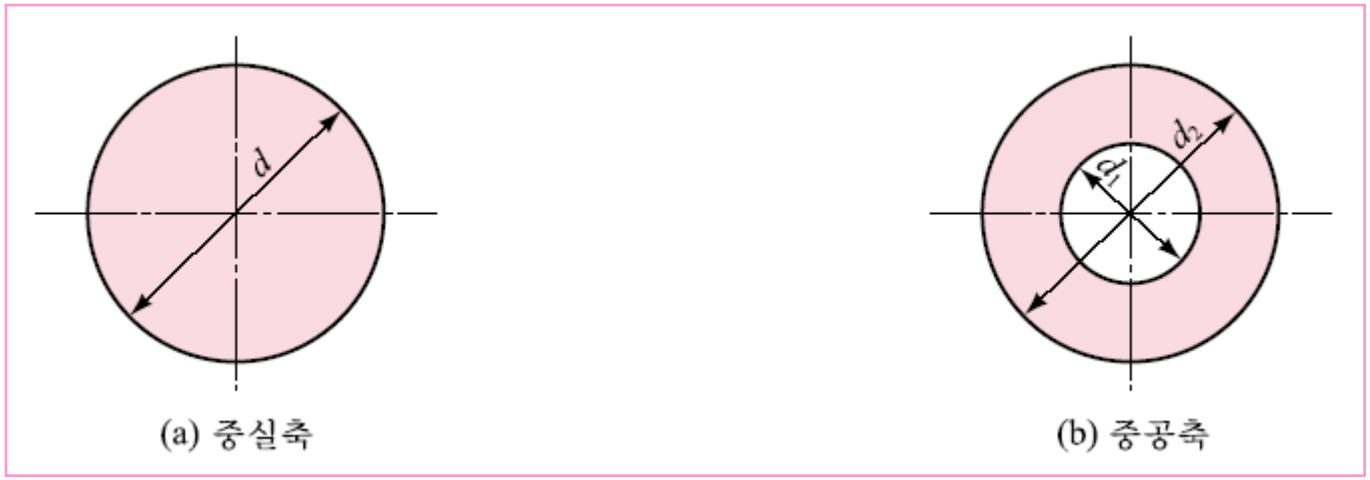
▪ d_1 : 안지름, d_2 : 바깥지름, x : 지름의 비($x = \frac{d_1}{d_2}$)

$$Z = \frac{\pi}{32}\frac{(d_2^4 - d_1^4)}{d_2} = \frac{\pi}{32}d_2^3(1 - x^4) \qquad (5 \cdot 3)$$

$$M = \frac{\pi}{32}d_2^3(1 - x^4)\sigma_b \qquad (5 \cdot 4)$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi(1 - x^4)\sigma_a}} \qquad (5 \cdot 5)$$

$d_1 = xd_2$ ⇒ 안지름 d_1을 구한다.



<그림 5-3> 원형축의 지름

(2) 비틀림만을 받는 축

- 비틀림 모멘트 T :

$$T = \tau \cdot Z_p, \quad \tau = \frac{T}{Z_p} \qquad (5 \cdot 6)$$

① 중실축의 경우

- 극단면 계수 : $Z_p = \dfrac{\pi d^3}{16}$

$$T = \tau \cdot Z_p = \tau \frac{\pi d^3}{16} \qquad (5 \cdot 7)$$

- 축의 지름 :

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi \tau_a}} \qquad (5 \cdot 8)$$

τ_a : 축의 허용 비틀림응력