

# Chapter 8. 나사

- 나사 : 결합요소  
회전운동 ↔ 직선운동 : 상호 변환 요소  
작은회전 Moment → 큰 축방향의 힘

## 8-1 나사의 구성

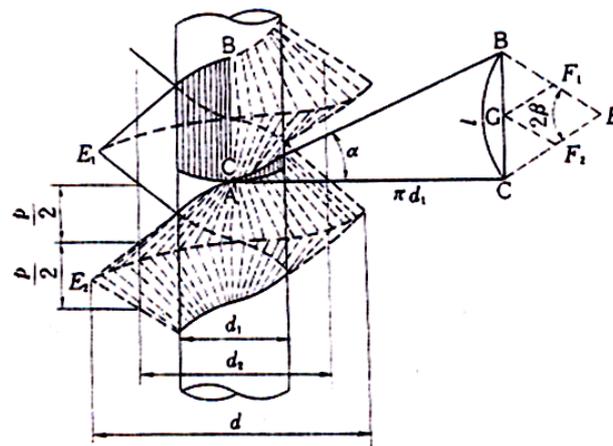


그림 8-1 나사

- helix : AB가 원기둥에 그리는 곡선  
(삼각형 ABC를 원기둥에 감을 때)
- load( $l$ ) : 한바퀴 돌았을 때 올라간 거리  $l$
- load 각( $\alpha$ ) : 경사각  $\angle BAC$  나사의 유효지름기준

$$\tan \alpha = \frac{l}{\pi d_2} \quad d_2 : \text{유효지름}$$

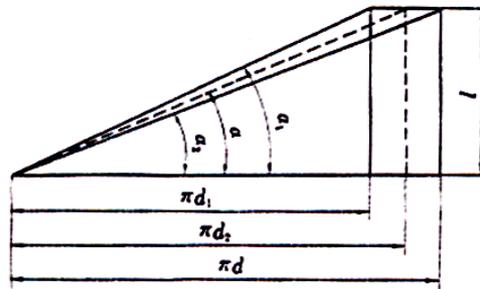


그림 8-2 lead 각

- 오른나사 (right hand screw) : 오른쪽으로 올라가는 나사  
↔ 왼나사 (left hand screw)
- pitch : ① 1줄 나사에서 1회전할 때 나사가 이동하는 거리

$$l = np \quad n: \text{줄수}$$

② 나사살의 축방향 거리

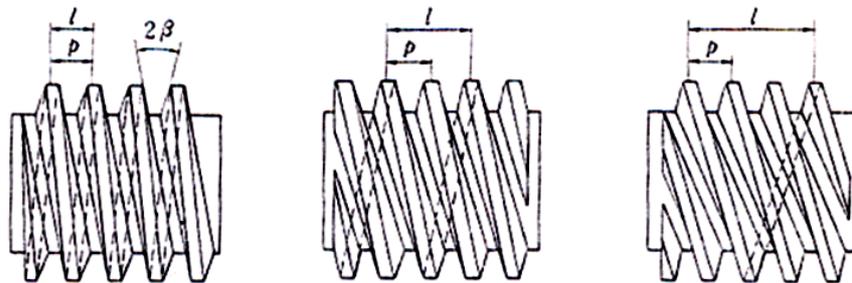


그림 8-3 여러줄 나사

## 8-1-2 나사의 명칭

1) 바깥지름 : 수나사의 축에 직각으로 측정한 최대지름  $d$   
공칭지름  $d$

2) 골지름 : 수나사의 최소지름  $d_1$

3) 안지름 : 암나사의 최소지름

4) 유효지름 :  $\frac{1}{2}(d + d_1) = d_2$  : 피치지름

$$h = \frac{(d - d_1)}{2}$$

## 8-2 나사의 종류와 등급

◦ 나사산 모양 : 3각나사, 4각나사, 사다리꼴나사, 톱니나사, 둥근나사...

8-2-1 3각나사 (Triangular Screw Thread)

- 체결용나사 : 가장 많이 사용
- 미터나사, 유니파이나사, pipe用인 관통나사...

(1) 미터나사

- 나사의 지름과 피치를 mm로 표시한 것. 나사산 각=60°

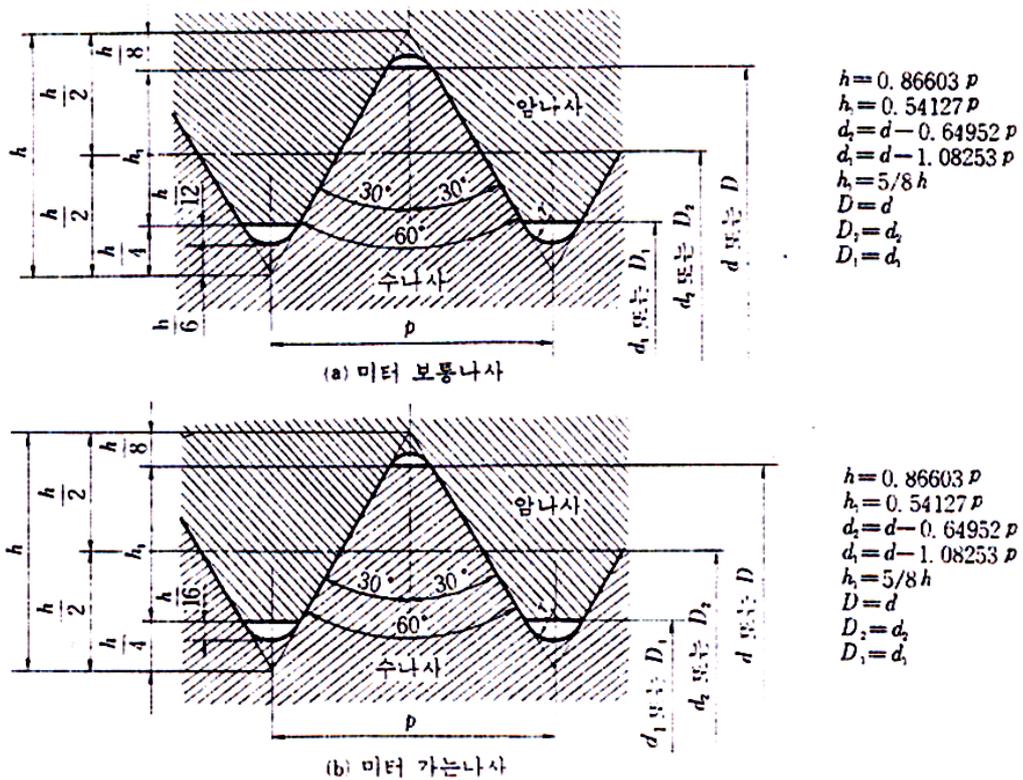


그림 8-5 미터나사의 모양

- 표 8-1 미터보통나사 (KS B0201)
- 표 8-2 미터가는나사 (KS B0204) 참조

8-2-2 4각나사 (square thread)

- 운동용나사 : 나사효율 가장 좋음, 공작의 어려움, 나사프레스, 대형선반의 이송나사 등에 사용.

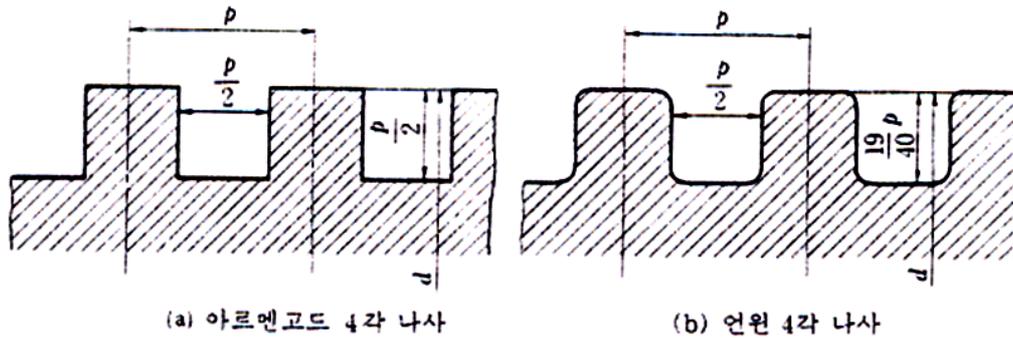


그림 8-7 4각나사

8-2-3 사다리꼴나사 (Trapezoidal Screw Thread)

- 4각나사의 장점 ( 높은 효율) + 가공의 어려움 해결 = 사다리꼴 나사  
→ 운동용나사

8-2-6 Ball Screw (볼나사)

- 효율 = 90%이상 (Ball의 구름접촉)
- 수치제어용 공작기계의 이송나사

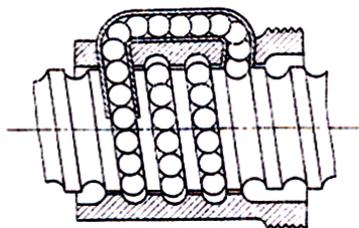


그림 8-11 볼나사

### 8-3 나사의 力學

#### 8-3-1 나사를 죄는데 필요한 Torque

[1] 4각나사의 경우

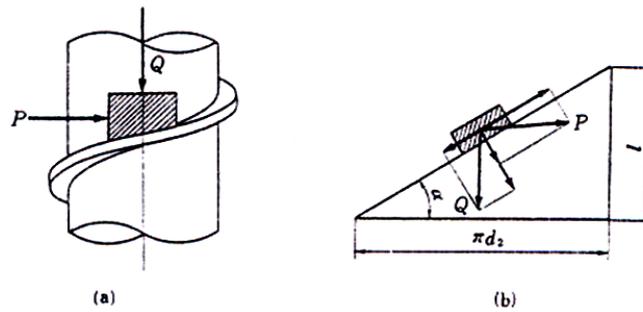


그림 8-12 나사에 작용하는 힘

- 나사를 돌리는 힘 = P
- 축방향 힘 = Q
- $\Sigma F(\text{나사빗면의 평행 성분}) = 0$

$$\Rightarrow \frac{P \cos \alpha - Q \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} = \frac{\mu(Q \cos \alpha + P \sin \alpha)}{1 - \mu \tan \alpha} \quad \text{①}$$

(나사면의 평행력)      (나사면의 수직력)

$$\Rightarrow P = Q \cdot \frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} = Q \cdot \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \tan \alpha} : \tan \alpha = \frac{l}{\pi d_2}$$

$$\boxed{P = Q \cdot \frac{l + \pi d_2 \mu}{\pi d_2 - \mu l}} \quad \text{or} \quad \boxed{P = Q \tan(\alpha + \rho)}$$

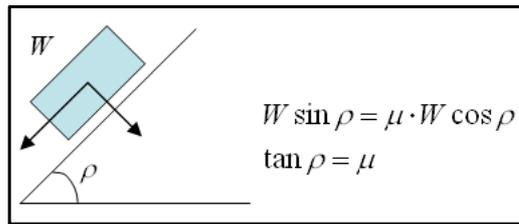
- 마찰각  $\rho$  :  $\tan \alpha = \mu$

- 나사 죄이는 Torque

$$T = P \cdot r = Q \cdot r \cdot \tan(\alpha + \rho) = Q \cdot r \cdot \frac{l + \pi d_2 \mu}{\pi d_2 - \mu l}$$

$r$  : 유효지름의 1/2

- 나사를 풀때 :



$P'$  : 푸는힘  $P' = Q \tan(\rho - \alpha)$

$T'$  : 푸는 Torque  $T' = Q r \tan(\rho - \alpha)$

- 자립체결 조건

$P' > 0 \rightarrow$  힘을 가해야 풀린다.

$$\therefore \rho > \alpha$$

( $\rho < \alpha$ 면 저절로 풀림)

[2] 3각나사의 경우

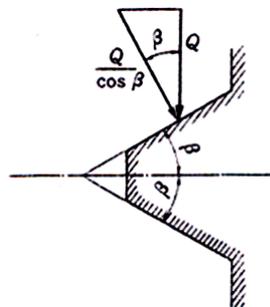


그림 8-13 3각나사의 수직력

◦ 나사면의 수직력 =  $\frac{Q}{\cos\beta}$

◦ 마찰력 =  $\mu \cdot \frac{Q}{\cos\beta} = \mu'Q$

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos\beta} = \tan\rho'$$

◦  $P = Q \tan(\alpha + \rho')$

$T = Q r \tan(\alpha + \rho')$

◦  $\mu' > \mu$  ( $\because \cos\beta < 1$ )

→ 체결용으로 3각나사가 훨씬 유리

◦ 너트와 washer의 마찰도 고려할 때

$$T = Q \{ r \tan(\alpha + \rho') + r_n \mu_n \}$$

$r_n$  : 접촉면의 평균반지름

$\mu_n$  : 너트와 washer 밑면의 마찰계수

## 8-3-2 나사의 효율

- 마찰이 '0' 면

$$P_0 = Q \tan \alpha = Q(p/\pi d_2) \quad p: \text{pitch}$$

- 효율  $\eta = Q$ 가 한일(출력)/ $P$ 가 한일(입력) (1회전동안)

$$= \frac{Qp}{2\pi rP}$$

$$= \frac{\pi d_2 P_0}{2\pi (d_2/2)P} = P_0/P$$

$$= \frac{Q \tan \alpha}{Q \tan(\alpha + \rho)} = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \rho)}$$

- 삼각나사의 효율  $\eta'$

$$\eta' = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \rho')}$$

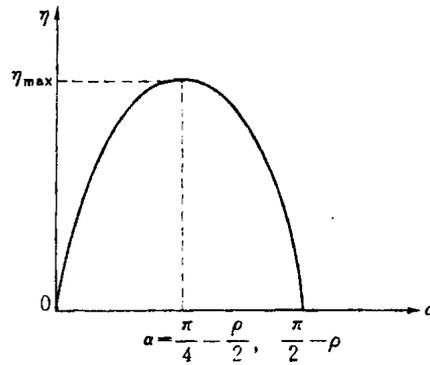


그림 8-14  $\eta$ 와  $\alpha$ 의 관계

◦  $\eta = 0$  :  $\alpha = 0$  및  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \rho$

◦  $\eta_{max}$  :  $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$  에서

$$\eta_{max} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$$

◦ 자립잠김(Self Locking) :  $\alpha = \rho$

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan 2\alpha} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\tan^2\alpha < 0.5$$

→ 나사가 자립잠김 조건을 만족하면 효율은 50%보다 작다.

## 예제 8-1

M16 Bolt에 Nut를 죄어서 물체 체결.

스패너 팔길이 20cm, Force = 10kgf, 나사산 마찰계수=0.1, Nut밑면 마찰계수=0.2, 너트접촉면의 평균지름은 나사유효지름의 1.4배, 나사축에 걸리는 힘=?

## Sol

◦ M16의  $p = 2mm$  유효지름=14.701mm

$$\tan \alpha = \frac{2}{14.701\pi} = 0.0433 \rightarrow \alpha = 2^\circ 29'$$

◦ 나사산각=60°  $\rho'$  : 등가 마찰각

$$\tan \rho' = \frac{0.1}{\cos 30^\circ} = 0.1155 \quad \rho' = 6^\circ 35'$$

◦  $10 \times 200 = Q \left\{ \frac{14.701}{2} \times \tan(2^\circ 29' + 6^\circ 35') + 1.4 \times \frac{14.701}{2} \times 0.2 \right\}$

$$\rightarrow Q = 619\text{kgf}$$

예제 8-2

잭 : 4각나사  $2p = 25.4$   $d = 49$   $d_1 = 36.3$

잭 lever : 610mm 132N Force 작용

지지할 수 있는 하중 = ?

Collar : 바깥지름 = 100mm 안지름 = 50mm

마찰계수 : 나사면=0.15 Collar = 0.1

Sol

$$p = 12.7\text{mm} = l$$

$$d_2(\text{유효지름}) = \frac{49 + 36.3}{2} = 42.65\text{mm}$$

나사부 Torque  $T_1$

$$T_1 = \frac{d_2}{2} \cdot Q \cdot \frac{l + \pi d_2 \mu}{\pi d_2 - \mu l}$$

$$= \frac{42.65}{2} \cdot Q \cdot \frac{12.7 + 0.15 \cdot \pi \cdot 42.65}{\pi \cdot 42.65 - 0.15 \cdot 12.7} = 3.97Q$$

Collar부 Torque  $T_2$

$$T_2 = Q \cdot 0.1 \cdot \frac{((100 + 50)/2)}{2} = 3.75Q$$

전체 Torque  $T = T_1 + T_2 = (3.97 + 3.75)Q = 7.72Q$

$$T = 610(\text{mm}) \times 132(\text{N}) = 7.72Q(\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$\rightarrow Q = 10430\text{N} = 10.43\text{KN}$$

## 8-4 나사의 부품

### 8-4-1 Bolt 및 Nut

### 8-4-2 Bolt 종류

- (1) 관통 Bolt
- (2) Tap Bolt
- (3) Stud Bolt
- (4) Reamer Bolt

### 8-4-3 특수 Bolt 및 특수 Nut

### 8-4-4 여러 가지 나사

- (1) Cap Screw
- (2) Set Screw
- (3) Wood Screw
- (4) Tapping Screw

## 8-5 나사의 강도설계

### 8-5-1 Bolt의 강도

[1] 축방향으로 인장하중만을 받는 경우

$$Q = \frac{\pi d_1^2 \sigma_t}{4} \quad d_1 : \text{골지름}$$

[2] 축하중 + 비틀림 Moment를 동시에 받는 경우

$$T = Q r \tan(\alpha + \rho')$$

$$\tau = \frac{T}{\left(\frac{\pi}{16} d_1^3\right)} = \frac{16 Q r \tan(\alpha + \rho')}{\pi d_1^3}$$

$$\sigma_t = Q / \left(\frac{\pi}{4} d_1^2\right)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} \quad (\leq \tau_a : \text{안전})$$

[3] 죄어진 볼트에 인장하중이 작용하는 경우

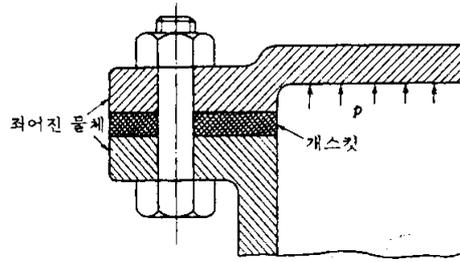
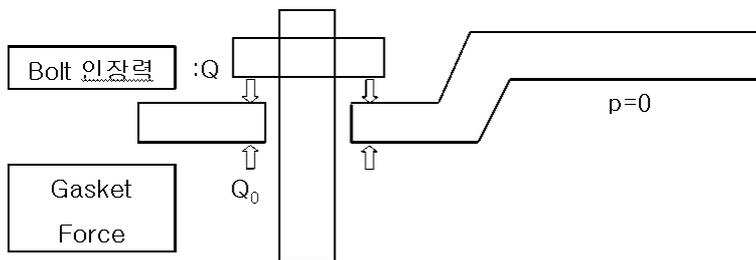


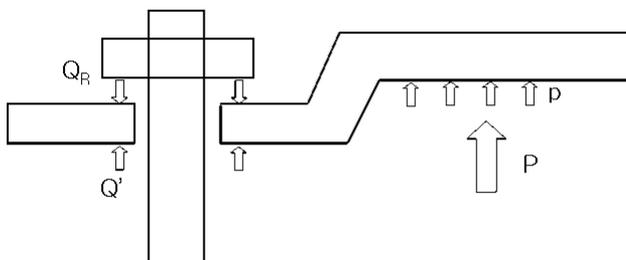
그림 8-25 압력 용기용 Bolt

Case 1 :

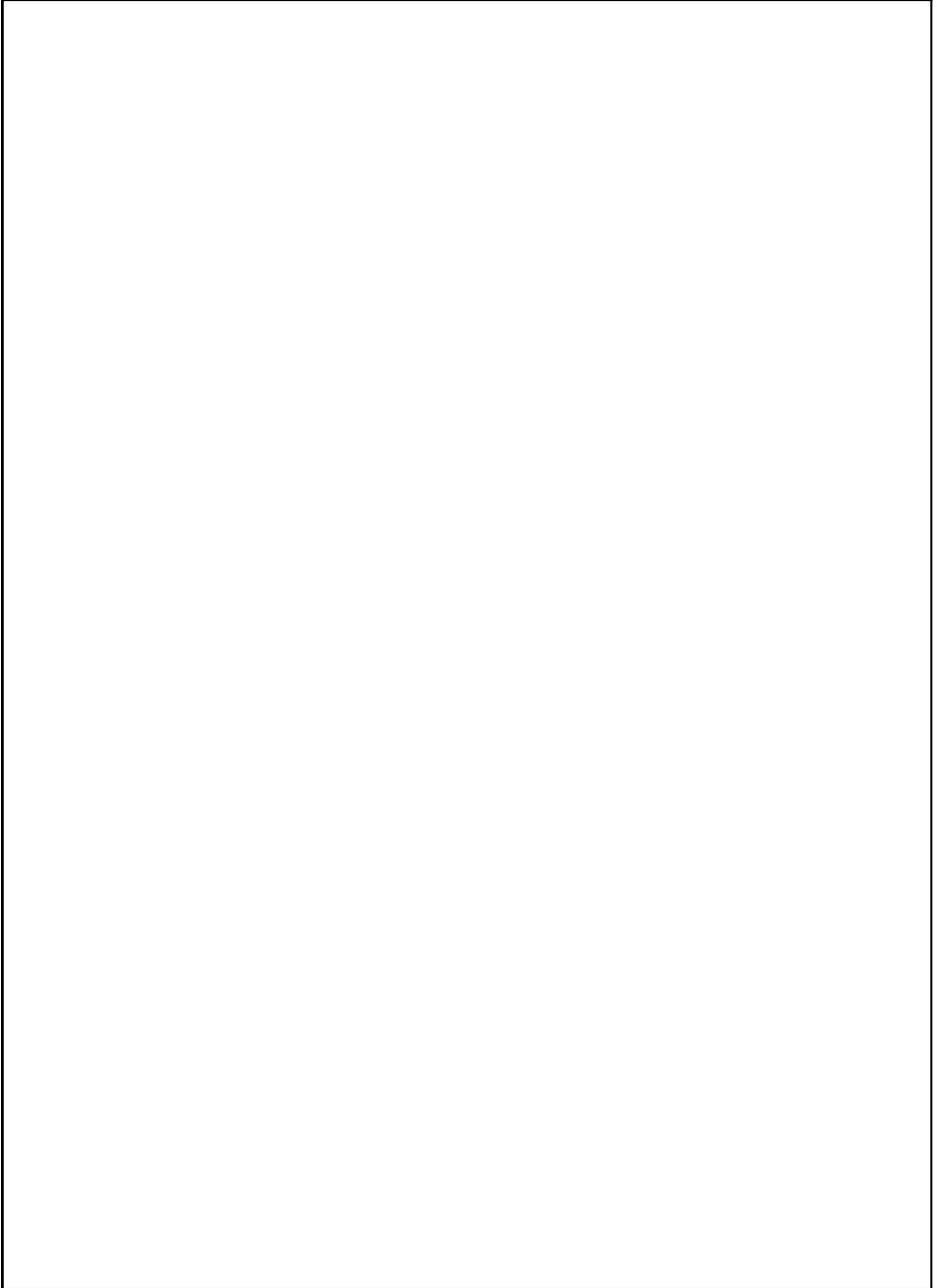


$p = 0$  때의 FBD  
 $Q = Q_0$

Case 2 :



$p$  작용 시의 FBD  
 $Q_R = Q + P - \text{①}$



- Bolt 초기 인장량  $\delta_t = Q_0/k_b$  - ②
- Gasket 초기 압축량  $\delta_c = Q_0/k_g$  - ③
- Gas 압력  $p$  작용 후  
Bolt 가 추가로 늘어난 길이 =  $\delta$ 라 하면
- Gasket과 Bolt가 같이 접촉하여 움직이므로  
Gasket의 늘어난 길이 =  $\delta$
- $Q_R = (\delta_t + \delta) \cdot k_b$  : 인장력  
 $Q = (\delta_c - \delta) \cdot k_g$  : 압축력
- $P$ 와  $\delta$ 의 관계식

②, ③에서

$$Q_R = Q_0 + \delta k_b$$

$$Q = Q_0 - \delta k_g$$

①에 대입

$$Q_0 + \delta k_b = Q_0 - \delta k_g + P$$

$$\delta = \frac{P}{(k_b + k_g)}$$

$$\circ k_b = Q_0/\delta_t, k_g = Q_0/\delta_c$$

$$\Rightarrow \boxed{\delta = \frac{P(\delta_t \cdot \delta_c)}{Q_0(\delta_t + \delta_c)}} - \textcircled{4}$$

$$\circ Q = 0 : \text{Gasket의 압축력} = 0$$

→ Gasket 역할 상실

→ Gasket과 Bolt의 접촉 파괴

→ Gas가 샌다.

$$\text{조건} : Q = 0 : \delta = \delta_c \rightarrow \textcircled{4}$$

$$\Rightarrow \boxed{P = \frac{Q_0(\delta_t + \delta_c)}{\delta_t}} : \text{Gasket 기능 상실 조건}$$

$$\circ \text{일반적인 } Q_R \text{과 } P \text{의 관계식}$$

$$Q_R = Q_0 + \delta k_b = Q_0 + \frac{P(\delta_t \cdot \delta_c)}{Q_0(\delta_t + \delta_c)} \cdot \frac{Q_0}{\delta_t}$$

$$\Rightarrow \boxed{Q_R = Q_0 + \frac{P\delta_c}{\delta_t + \delta_c}}$$

8-5-2 Nut의 높이

- $H = np$        $n$  : 나사산의 수  
                    $p$  : pitch  
                    $H$  : Nut의 높이

- 나사산 파괴 : 굽힘 or 전단

- 3각나사 : 굽힘에 의한 파괴
- 4각나사, 사다리꼴 나사 : 전단작용에 의한 파괴
- 주철 : 전단작용에 의한 파괴

[1] 굽힘 강도

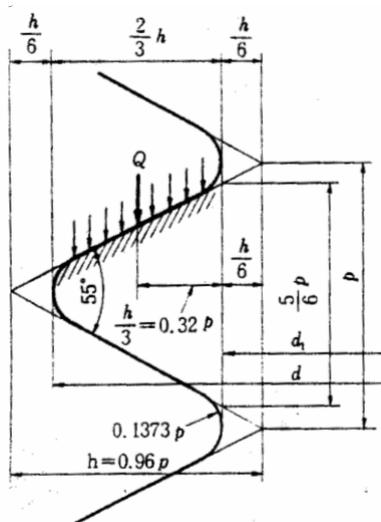


그림 8-31 너트의 높이

집중하중 Q 끝에서  $\frac{h}{3}$ 의 곳에 작용한다면

$$Q = \frac{\pi}{4} d_1^2 \sigma_t - \text{①}$$

$$M = \frac{h}{3} Q = 0.32PQ \quad (\because \frac{h}{3} = 0.32P) \quad -②$$

단면높이 =  $\frac{5}{6}P$ , 너비 =  $n\pi d_1$ 인 4각형 단면

$$Z = \frac{1}{6} (n\pi d_1) \left(\frac{5}{6}P\right)^2 = \frac{25}{216} n\pi d_1 P^2 \quad -③$$

굽힘 응력  $\sigma_b$ , ②, ③에서

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{2.765Q}{n\pi d_1 P}$$

$Q$ 에 ① 대입

$$\sigma_b = 0.69 \frac{d_1}{nP} \sigma_t$$

$$H = nP = 0.69 \frac{\sigma_t}{\sigma_b} d_1$$

허용  $\sigma_t$ 와 허용  $\sigma_b$ 를 같다고 하면 ( $\sigma_t = \sigma_b$ )

$H = 0.69d_1$ ,  $d_1 = 0.85d$ 로 하면

$$H = 0.6d$$

[3] 나사산의 접촉압력

◦ 나사산에 작용하는 접촉압력을 제한하여 너트높이 결정

$$P_m = \frac{Q}{n \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2)}$$

$Q$  : 축하중,  $P_m$  : 평균 접촉압력

$$\rightarrow P_m = \frac{Q}{n\pi d_2 h}$$

$d_2 = (d + d_1)/2$  : 유효지름

$h = (d - d_1)/2$  : 나사산 높이

표 8-12 허용 접촉압력

재 료		$P_a (kg_f/cm^2)$	
볼트	너 트	결합용	전동용
연강	연강 또는 청동	300	100
경강	경강 또는 청동	400	130
강	주 철	150	500

◦ 허용 접촉압력을  $P_a$ 로 하면,

$$Q = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2) h P_a$$

$$n = \frac{4Q}{\pi (d^2 - d_1^2) P_a} = \frac{Q}{\pi d_2 h P_a}$$

$$\therefore H = nP = \frac{4QP}{\pi (d^2 - d_1^2) P_a} = \frac{QP}{\pi d_2 h P_a}$$

예제 8-8

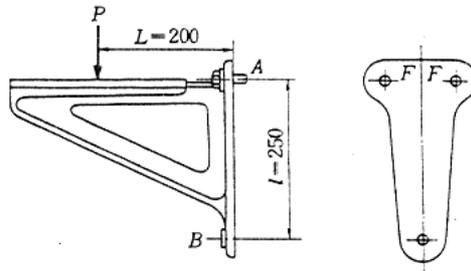


그림. 8-32 Bracket

d = 22mm의 Bolt로 벽에 고정. 4ton의 하중이 작용할 때 각 Bolt에 생기는 응력 ?

안전도 = ? 초기 나사가 죄는 힘은 무시.

Sol

- 아래 Bolt를 중심으로 Moment를 구하면

$$PL = 2Fl$$

- 하나의 Bolt에 가해지는 인장력 F

$$F = \frac{PL}{2l} = \frac{4000 \times 200}{2 \times 250} = 1600kg_f$$

- 인장응력  $\sigma_t = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d_1^2} = \frac{1600}{\frac{\pi}{4} \times 18.7^2} = 5.84kg_f/mm^2$

- 전단응력  $\tau = \frac{1}{3} \frac{F}{\frac{\pi}{4}d_1^2} = 4.85kg_f/mm^2$

- $\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} = 5.66kg_f/mm^2$

- $\tau_{allowable} = \frac{1}{2} S_y = \frac{1}{2} (24) = 12kg_f/mm^2$ 로 하면

- $SF = 12/5.66 = 2.1$  (안전계수)

예제 8-10

안지름 400mm, 내압 0.98MPa의 cylinder cover를 12개 Bolt로 조인다.

Bolt 허용 인장응력 = 47MPa일 때, Bolt 지름?

단  $\theta_0 = 2P, \delta_c/\delta_t = 2$

Sol

Bolt 하나에 걸리는 압력에 의한 인장하중 P는

$$P = pA/n = 0.98 \text{ (MPa)} \frac{\pi}{4} 400^2 \text{ (mm}^2\text{)} / 12$$

$$= 123150 \text{ N} / 12 = 10262.5 \text{ N}$$

$$Q_R = Q_0 + P \frac{\delta_c}{\delta_t + \delta_c}, \quad Q_0 = 2P$$

$$= 2 \cdot 10262.5 + 10262.5 \frac{2}{1+2} = \frac{\pi}{4} d_1^2 \sigma_t$$

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot 47 \times 10^6 \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \left( \frac{\text{m}}{10^3 \text{ mm}} \right)^2 = 27367 \text{ N}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{27367}{47} \frac{4}{\pi}} = 27.23 \text{ mm}$$