

소성역체결 볼트의 체결력과 마찰계수에 관한 연구

Study on the Tightening Force and the Friction Coefficient
in a Bolt tightened upto the Plastic Range

손 승요 *1)

신 근하 **1)

Son, Seung-Yo

Shin, Keun-Ha

ABSTRACT

When a bolt is tightened up to the range of plastic deformation, yielding is governed by the combined stresses due to the axial force developed in the bolt and the frictional torque developed on the thread in contact with the nut. Consideration is taken account of the fact that the unused portion of the thread has least sectional area being subject to initial yielding. Once yielding has taken place some strain hardening effect will result. Incremental stress-strain relations are used to treat the continued yielding, which is equivalent to treat continued yielding as if summing up the effects of thin walled cylinders subject to plastic deformation. M10 bolts of common and fine series thread are used for computational purposes. Variation of axial forces and frictional torques vs. the frictional coefficients are presented together with other plots showing some characteristics of bolt under plastic deformation.

1. 서론

볼트로 구조요소를 체결시 마찰토크에 의하여 볼트는 단순 인장시험시보다 작은 축력에서 항복을 일으킨다. 탄성역에서 볼트를 체결하는 경우 대개 볼트재료 항복강도의 60-70%정도 활용하므로 재료의 강도능력을 충분히 활용하지 못한다. 반면 소성역체결은 항복강도의 80-90%까지 고효율의 강도활용이 이루어진다. 따라서 소성역체결볼트는 저강도(강도구분 저급품)재료를 사용하거나 단면감소로 인한 경량화로 고효율, 성능저하의 경쟁력있는 응용제품이 되고있다.

요시모토등[1]은 토오크기울기법 제어를 이용한 소성역 체결실험을 한 결과 M10과 M16볼트의 축력분산이 토오크법의 0.5-0.33배정도로 감소함을 밝히고, 탄성역과 소성역체결체의 피로시험을 통하여 소성역체결의 피로수명이 더 길어지는 것을 확인하였다. 쓰지등[2]은 변위증분을 이용한 해석모델의 수치해와 시험을 통하여 소성역체결된 볼트의 여유나사부에서 인장응력은 중심근방, 전단응력은 주변부에서 높고 체결체에 외력이 작용하면 인장응력의 분포가 일정하게 되는 것을 밝혔다. 쓰지와 마루야마[3]는 소성역체결시험을 통하여 1)볼트는 체결정지점에서 나사부토크의 감소가 있는 경우 외력작용시에 탄성적으로 거동하는 범위가 있고 이 범위는 체결정지점에서 잔류하는 나사부 토크가 감소함에 따라 증가하고 2)체결시 볼트는 외주부로부터 항복이 시작되며 체결후 외력부하가 있을 때에는 중심부로부터 재항복이 일어남을 발견하였다. 쓰지등[4]은 소성역 체결체에 외력이 작용할 때의 불분명한 볼트거동을 구명하기 위하여 다음과 같은 세가지 유형의 시험편을 이용한 실험을 행하였다. I형 시험편은 내외 프레임으로 구성된 피체결체가 Load cell의 역할을 하여 피체결체의 강성이 낮은 경우이고(내외력비 $\phi=0.24$), II형 시험편은 볼트의 6각머리부분이 Load cell에 끼워져 풀린 경우로서 피체결체의 강성이 다소 높은 경우이며($\phi=0.16$), III형 시험편은 피체결체가 볼트의 좌면판이 되어 Load cell을 매개로 직접 2매의 판을 체결하므로써 피체결체의 강성이 매우 높은 경우에 해당한다($\phi=0.004$).

* 아주대학교 기계공학과 교수

** 아주대학교 생산자동화공학과 교수

2. 해석과정

2.1 해석모델과 공식화과정

Fig. 1의 해석모델에서 볼트를 소성역까지 체결할 때 항복의 시작은 최소단면이 여유나사부(l_s)에서 발생하며 체결축력이나 토오크는 바로 이부분이 좌우한다. Prandtl-Reuss의 증분변형을 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_z \\ d\gamma_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{\sigma_z^2}{H' \sigma^2} & \frac{3\sigma_z \tau_{z\theta}}{H' \sigma^2} \\ \frac{3\sigma_z \tau_{z\theta}}{H' \sigma^2} & \frac{1}{G} + \frac{9\tau_{z\theta}^2}{H' \sigma^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\sigma_z \\ d\tau_{z\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

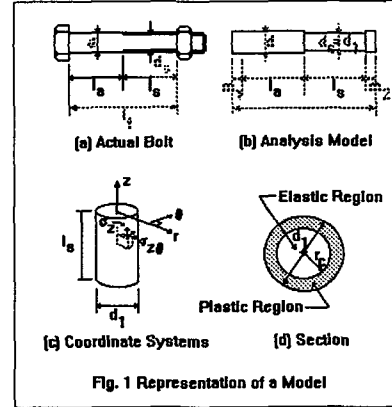


Fig. 1 Representation of a Model

증분이론에 의한 항복은 Fig. 1(c)의 中實원통이 두께가 얇은 무수한 中空원통의 결합으로 보고 이들 증공원통이 표면부로부터 안쪽으로 향하여 순차적으로 항복을 일으켜 간다고 본다. 원통의 길이방향 신장을 δ_s , 단위길이당의 비틀각을 θ_s 라 두고 유한증분을 나타내는 기호 Δ 를 이용하여 응력-변형관계를 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/l_s & 0 \\ 0 & r/l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_s \\ \Delta\theta_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{단} \quad D_{11} = \frac{1}{|D|} \left(\frac{1}{G} + \frac{9\tau_{z\theta}^2}{H' \sigma^2} \right)$$

$$D_{12} = \frac{-1}{|D|} \left(\frac{3\sigma_z \tau_{z\theta}}{H' \sigma^2} \right) = D_{21} \quad (3)$$

$$D_{22} = \frac{1}{|D|} \left(\frac{1}{E} + \frac{\sigma_z^2}{H' \sigma^2} \right)$$

$$|D| = \frac{1}{EG} + \frac{1}{H' \sigma^2} \left(\frac{9\tau_{z\theta}^2}{E} + \frac{\sigma_z^2}{G} \right)$$

축력과 토오크의 증분은 증분응력의 향으로

$$\Delta F = 2\pi \int_0^R \Delta\sigma_z r dr, \quad \Delta T = 2\pi \int_0^R \Delta\tau_{z\theta} r^2 dr \quad (4)$$

이라 쓸 수 있고 증분변위의 비는 다음과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{\Delta\delta_s}{\Delta\theta_s} = \frac{K' \int_0^R D_{11} r dr - \int_0^R D_{12} r^2 dr}{-K' \int_0^R D_{12} r^2 dr + \int_0^R D_{22} r^3 dr} \quad (5)$$

2.2 볼트축력과 체결토오크

체결시 볼트에 발생한 축력 F_b 와 체결토오크 T_f 간에는 다음식이 성립한다

$$T_f = T_s + T_w = K F_b d \quad (6)$$

여기서

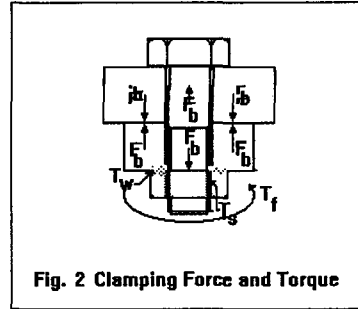
$$T_s = \frac{F_b}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' \right) = K' F_b \quad (7)$$

=나사면 마찰토크

$$K' = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' \right) \quad (8)$$

K = 토크계수, d=호칭지름

그리고 T_w 는 좌면마찰토크인데 이는 볼트의 항복과는 무관하다.



2.3 탄성역 반지름

볼트의 항복이 진행되는 동안 아직 항복이 일어나지않은 원통내부의 탄성역 반지름은 소성역과 탄성역의 경계면 반지름으로 von Mises의 항복조건이 만족되는 반지름을 구하면 다음과 같다.

$$r_c = \frac{l_s}{G\theta_s} \sqrt{\frac{1}{3} [\sigma_y^2 - (\frac{E\theta_s}{l_s})^2]} \quad (11)$$

단 원통전체가 탄성역 거동시는 $r_c=0$ 이다. r_c 는 수치해석시 변위증분에 따라 두께가 얇은 소성 원통의 항복범위를 제어하는데 사용된다.

3. 수치해석

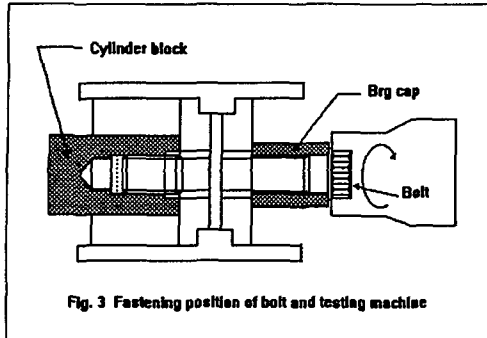
먼저 주어진 나사면마찰계수에 대하여 초기항복시의 축력과 나사면 마찰토크를 얻고 이후는 증분변형식을 이용하여 항복의 진행에 따른 축력과 토크를 계산하였다. 초기항복이후는 식 (5)의 증분변형비에서 볼트 축방향 변형에 증분을 주어 처리하였다. 계산에 사용한 볼트제원은 표 1에 보인바와 같고 수치계산의 일부를 정리한 것을 Fig. 4 - 7에 제시하였다.

표1. 계산에 사용된 볼트제원

호칭	피치	구분	호칭 지름	유효 지름	골밀 지름	등가 지름	여유 나사부
	mm		mm	mm	mm	mm	mm
M10	1.5	보통나사	10	9.026	8.376	8.593	
M10	1.25	가는나사	10	9.188	8.376	8.892	10~50
M10	1.0	가는나사	10	9.350	8.917	9.081	
M10	0.75	가는나사	10	9.513	9.188	9.298	

4. 실험

실험은 체결실험을 통하여 항복시점에서 축력, 토크계수 그리고 체결토크를 얻었다. 동일 로트의 볼트를 사용한 물성실험으로 탄성계수, 항복응력, 변형경화계수를 얻었다. 샘플링은 실제 볼트 생산공정의 특성을 감안하여 5번에 걸쳐 10개씩(즉 5개의 로트에서 로트당 10개) 무작위추출한 결과를 평균하였다. 체결시험은 시험기의 능력상 토크범을 바탕으로 하였다. 볼트제품의 품질에 대한 판별성과 체결설계를 위한 보편성을 위하여 충분한 수의 자료라고는 할 수 없으나 대체적인 경향을 비교하는데에는 무리가 없다고 생각된다.



체결시험기와 시험편의 부착상태는 Fig. 3과 같다. 실험에 사용한 볼트규격은 M10x1.25x99인 자동차 엔진용 실린더 헤드볼트이고 재질은 SCM435인데 물성시험결과는 다음과 같다.

- 항복강도 123 kgf/mm^2
- 인장강도 130 kgf/mm^2
- 변형경화계수 315 kgf/mm^2
- 종탄성계수 $E = 21000 \text{ kgf/mm}^2$
- 횡탄성계수 $G = 8077 \text{ kgf/mm}^2$
- 여유나사부 $l_s = 25 \text{ mm}$

좌면조도는 max 6S이고 열처리는 870° 에서 퀴칭후 템퍼링한 조질열처리이다. 표면은 망간계인 산염피막처리이고 윤활은 실제와 같은 엔진오일로 나사부를 도포한후 체결시험을 하였다. 실험데이터는 수치제산에 그대로 사용하였고 결과는 그림에 제시하였다.

5. 고찰

Fig. 4와 Fig. 5에서 항복시의 볼트축력이나 나사면의 마찰토크가 마찰계수에 대하여 거의 선형적 변화를 하는 것을 볼 수 있으며 피치의 영향은 볼트축력과 마찰토크에서 상반되는 경향을 보여주고 있다. 즉 피치가 작을수록 나사의 유효지름이 커지므로 축력은 증가하지만 나사산의 높이가 낮아지므로 접촉면적이 감소하여 마찰토크는 감소한다. 실험치는 토오크계수로부터 마찰계수를 추정하여 삼입하였는데 계산치보다 축력(2%)과 마찰토크(8%) 모두 계산치보다 상회하는 값을 보이고 있다. Fig. 3은 볼트항복시 여유나사부를 경수로 한 축력과 마찰토크의 관계를 보여준다. 마찰계수와 피치의 영향은 Fig. 4와 Fig. 5에서 본 바와 같고 이에 여유나사부의 영향이 추가되었다. Fig. 7은 여유나사부의 영향을 확대하여 보인 것으로 여유나사부의 길이가 항복에 미치는 영향은 비교적 작음을 보여주고 있다.

6. 결론

변형중분이론을 바탕으로 볼트의 소성역계절 거동을 해석하였다. 마찰계수와 더불어 볼트의 기하학적 제원 변화에 대한 항복시의 체결력이나 나사면 마찰토크는 마찰계수에 대하여 거의 선형비례관계이며 피치나 여유나사부 길이는 이에 큰 영향을 미치지 않는다. 이러한 특성은 볼트 설계에 상당한 융통성을 부여한다고 볼 수 있다. 볼트의 항복을 좌우하는 마찰은 나사면에 국한되므로 좌면마찰을 포함한 체결토크는 풀림등을 검토하는데에는 유효하지만 체결력과 직접관련되는 것은 나사면마찰 뿐이므로 나사부품 제조시 또는 체결시 나사면과 좌면에서의 마찰계수를 적절히 제어함으로써 나사의 강도활용에 대한 효율을 향상할 수 있다고 하겠다.

참고문헌

1. 大橋宣俊, 萩原正彌, 吉本勇, “塑性域 ねじ締結の 特性 - 締付軸力のばらつきと耐疲労性”, JSPE, Vol 51, No. 07, '85-07-1383
2. 迂裕一, 吉田總仁, 丸山一男, “塑性域締結におけるねじ締結體の舉動 - ひずみ増分理論による解析”, JSPE, Vol 54, No. 01, '88-01-189
3. 迂裕一, 丸山一男, “塑性域締結におけるねじ締結體の舉動 - 締付け停止時のねじ部トルクの影響”, JSPE, Vol 56, No. 03, '90-03-503
4. 裕一, 丸山一男, “塑性域締結におけるねじ締結體の舉動 - 降伏軸力の推定の際のねじ部の假想直徑”, JSPE, Vol.58, No. 07, '92-07-1227

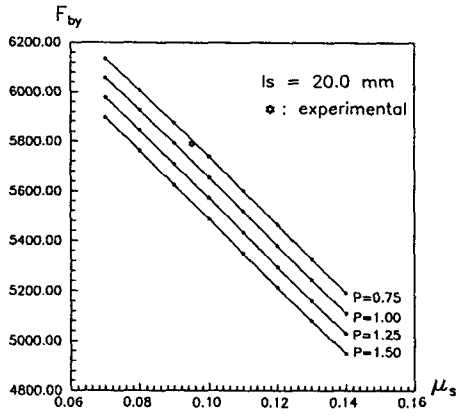


Fig.4 Variation of axial force vs. friction coefficient with pitch as parameter

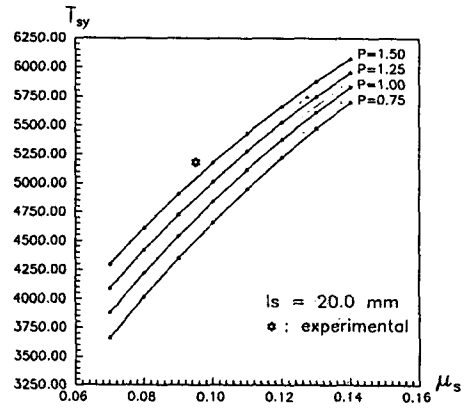


Fig.5 Variation of friction torque on thread vs. friction coefficient with pitch as parameter

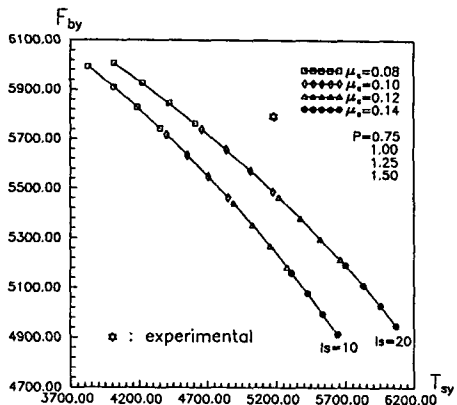


Fig.6 Axial force vs. friction torque on thread at yielding with friction coefficient and pitch as parameter

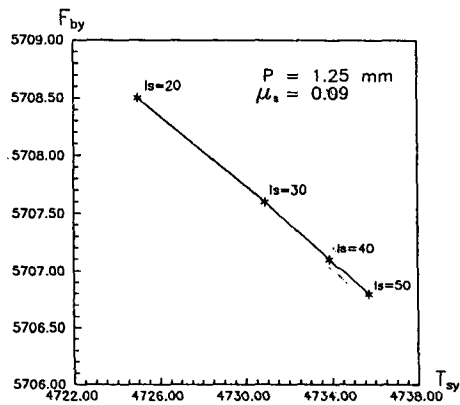


Fig.7 Effect of engaged thread length on axial force and friction torque