

볼트 체결시 진동에 의한 마찰계수 변화에 관한 실험

송창규[†] · 이상돈 · 조용주*

부산대학교 정밀기계공학과, *부산대학교 기계공학부

An Experimental Study of Friction Coefficient Variation Due to Vibration for Bolted Joint

Changkyu Song[†], Sangdon Lee and Yongjoo Cho*

Precision and Mechanical Engineering, Pusan National University

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University*

Abstract – It is very important to connect machinery and maintain it. This is usually done by bolt joint. There are two ways in connecting the bolt joint : the angle method and the torque method. The torque method is a method that let the clamping force maintain. The underhead of the bolt's head and the thread friction are the main influences. This study focuses on how the clamping force and friction coefficient change under the condition in vibrating the underhead of the bolt's head part. As a result, under vibration condition, we found out that the clamping force increases, while the friction coefficient decreases.

Key words – fastener, friction, torque, vibration.

1. 서 론

첨단기술의 발전은 관련 장치 및 부품에 대한 고도의 정밀도를 요구하고 있으며 만약, 각 부품 하나하나가 그 성능을 제대로 발휘하지 못한다면 그 첨단기술은 한낱 꿈에 불과한 것이며 그만큼 기술경쟁에서 낙후되기 마련이다. 따라서 기계요소 설계기술은 각종 첨단기술의 개발에서 중요한 기반기술로 인식되고 있다. 그 중에서도 특히, 체결 볼트는 평범한 기계요소처럼 보이지만 매우 중요한 기계요소로서 체결부위를 함께 단단하게 유지시키고 유체압력을 포함할 수도 있으며 접촉면에 대한 내부마찰과 함께 전단하중에도 저항할 수 있는 역할을 담당한다. 또 조여진 물체의 압축력과 외부에서 작용되는 하중진동을 흡수하여 변동 피로 하중으로부터 체결요소를 보호하는 능력을 가진 기계요소로서 이러한 볼트 관련기술은 전체 기계시스템의 성능과도 직결되는 기술이라 할 수 있으며 따라서 기계

시스템에 따른 볼트의 알맞은 선택과 적절한 체결방법은 매우 중요하다 하겠다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 볼트의 체결 방법에는 각도법과 토크법이 널리 사용되고 있다. 각도법은 체결의 신뢰성은 높으나 너트회전각의 측정 시작점을 결정하기가 어려우며 체결축력은 소성역에 도달해 있음으로 인해 발생하는 여러가지 문제점들 때문에 엔진용이나 건설용 고장력 볼트등에만 국한되어 사용되고 있는 실정이다. 이에 반해 토크법은 볼트축에 발생하는 예장력을 일정하도록 하는 체결방법으로 체결토크만을 일정하게 관리함으로써 쉽게 적용시킬 수 있어 현재 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 이러한 토크법은 예장력의 분산이 큰 결점이며 또한 무급유 체결시에 볼트가 파괴를 일으키거나 또는 적절한 후기 체결력을 유지시키지 못하는 등의 많은 문제점을 일으키고 있다.

이 실험의 목적은 볼트 언더헤드부의 마찰계수의 영향을 파악하는데 있다. 마찰계수는 실험 조건의 변화에 상관없다고 생각하고 실험에 들어간다.

[†]주저자 · 책임저자 : gomdoli99@pusan.ac.kr

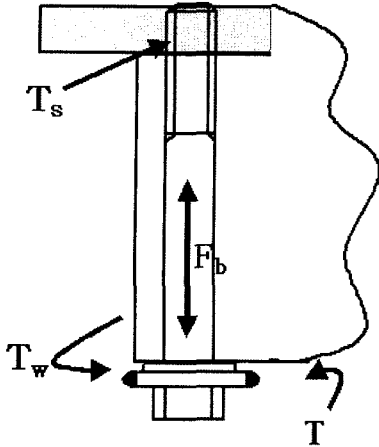


Fig. 1. Bolted joint.

2. 이론적 배경

2-1. 체결토크와 체결력과의 관계

Fig. 1에 보인 것처럼 체결용 1줄 3각 나사로 된 볼트로 피체결물을 체결할 때 볼트의 축력 F_b 를 내기 위한 체결토크 T_f 는 나사면토크 T_s 와 자리면토크 T_w 로 나눌 수 있다. 즉, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$T_f = T_s + T_w = \frac{T_f(P}{2} + \mu_s d_s \sec \alpha' + \mu_w D_w) = K F_b d \quad (1)$$

여기서, P =피치, s =나사면 마찰 계수, d_s =나사면 유효지름, d =볼트의 호칭지름이며 T_s , T_w , K 는 각각 다음과 같다.

$$T_s = \frac{d_s}{2} U_s = \frac{F_b(P}{2} + \mu_s d_s \sec \alpha') \quad (2)$$

$$T_w = \frac{F_b}{2} \mu_w D_w \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{2d} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_s \sec \alpha' + \mu_w D_w \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 첫째 항은 토크 계수중 경사면(나사면)을 올라가는 데 필요한 토크, 둘째항과 셋째항은 각각 나사면과 자리면의 마찰을 이겨내는데 필요한 토크를 나타낸다.

2-2. 체결축력 관리 방법

나사의 체결방법은 크게 탄성역 체결 방법과 소성역 체결방법으로 나눌 수 있다.

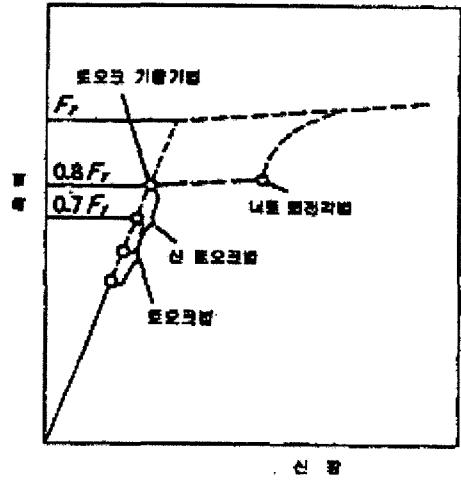


Fig. 2. The relationship of bolt extension and clamping force.

탄성역 나사체결 방법은 Fig. 2에 보인 바와 같이 나사부품이 가진 항복점 (또는 내력) 이하의 탄성역 내에서 체결하는 방식으로 외력이 작용할 때 나사부품의 축력이 탄성한계를 넘지 않도록 충분한 여유(안전율)를 보아 설계되었다. 그래서 일반적으로는 나사부품이 가진 항복점 또는 강도의 60~70% 이하의 영역에서 사용되었으며 나사부품의 인장강도(규격치)에 대한 체결력은 그 기계적 성질에 따라 다르다. 어떤 경우는 40~50%가 되는 것도 있고 해서 강도적인 사용효율이 반드시 좋다고 말할 수는 없다. 또 탄성역 체결에서는 토크법에 의한 체결이 많이 쓰이고 있으나 토크계수의 분산에 따라 체결축력(예: 장력)이 변동하고 체결력이 불안정한 상태로 되기 쉬워서 이의 안정화가 중요한 관심사가 되고 있다.

소성역 나사체결 방식은 Fig. 2에 보인 바와 같이 체결시 발생한 축방향의 응력이 나사부품이 가진 항복점 이상이 되도록 체결하는 방식이다. 즉 이 방식은 탄성한계나 이를 넘어서는 정도로 체결한다. 나사부품의 인장강도(규격치)에 대한 체결축력은 그 기계적 성질이나 나사면 마찰계수에 의하여 다르지만 80~90% 또는 그 이상이 되기때문에 강도적인 사용효율은 탄성역 나사체결보다 훨씬 높다. 그러나 이 방식에 의한 체결축력은 소성역에 도달해 있으므로 예상하는 효과를 올리기 위하여는 나사체결체에서 소성현상, 과도체결에 의한 영향, 소성역에서의 내력과 외력과의 관계, 축력의 설정방법, 체결방법 등에 대하여 충분히 고려해야 한다.

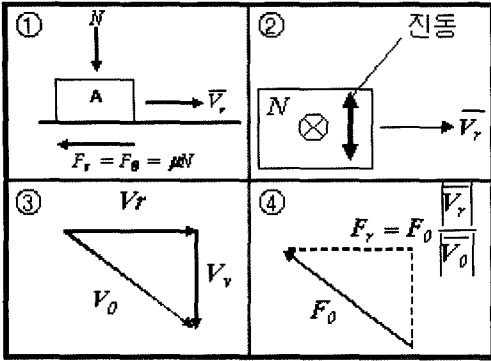


Fig. 3. Explanation of vibrated effect.

2-3. 진동의 효과

Fig. 3-① 및 3-②는 물체의 상태도이며, Fig. 3-③ 및 3-④는 원리 상태도로서, 이를 상세히 설명하면, Fig. 3-①에서와 같이, 어떤 물체 A가 수직 접촉력 N을 받으면서 속도 v_r 로 움직이고자 할 때 마찰 저항은 $F_r = F_0 = \mu N$ 이고(N : 수직 접촉력, μ : 마찰계수) 마찰력 방향은 속도 v_r 과 반대 방향이다.

Fig. 3-②에서와 같이 v_r 의 수직 방향으로 진동을 가하여 임의의 순간의 진동속도가 v_v 라면 Fig. 3-③과 같이 물체의 순간 속도는 $v_0 = v_r + v_v$ 이고, 마찰력 방향은 v_0 의 반대 방향으로 나타나며, 그 크기는 μN 이다. Fig. 3-④에 나타낸 바와 같이 움직이고자 하는 방향 v_r 방향의 마찰력,

$$F_r = F_0 \frac{V_r}{V_0} = \mu \frac{V_r}{V_0} N = \mu' N \tag{5}$$

여기서 $V_0 = \sqrt{V_r^2 + V_v^2}$ 이고 μ' 은 겹보기 마찰계수로 다음과 같다.

$$\mu' = \mu \frac{V_r}{V_0} = \mu \frac{V_r}{\sqrt{V_r^2 + V_v^2}} = \mu \frac{1}{\sqrt{1 + (V_v/V_r)^2}} \tag{6}$$

겹보기 마찰계수 μ' 은 진동속도 V_v 가 빨라질수록 원래 마찰계수 μ 보다 $1/\sqrt{1 + (V_v/V_r)^2}$ 의 비율로 작아짐을 알 수 있다.

따라서 움직이고자 하는 방향에 수직 방향으로 진동을 가하면 움직이고자 하는 방향으로 나타나는 마찰력은 줄어드는 효과가 나타난다. 이 원리를 이용하여 나사의 체결시 진동을 가함에 따라 나삿니와 나사 자리면에 걸리는 회전방향 마찰력을 줄일 수 있다.

나사의 체결에서 진동에 의한 마찰력의 감소로 체결력이 증가하는 효과는 다음과 같다.

진동을 가하지 않을 때와 가할 때의 체결토크 T_f 에 의한 각각의 나사 체결력 Q_f 와 Q'_f , 그리고 이 둘의 비율은 다음과 같다.

$$Q_f = 2T_f \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha + \mu_w D_w \right) \tag{7}$$

$$Q'_f = 2T'_f \left(\frac{P}{\pi} + \mu'_s d_2 \sec \alpha + \mu'_w D_w \right) \tag{8}$$

$$\frac{Q'_f}{Q_f} = \frac{\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha + \mu_w D_w}{\frac{P}{\pi} + \mu'_s d_2 \sec \alpha + \mu'_w D_w} \tag{9}$$

여기서 $\mu'_s = \mu_s \frac{V_r}{V_0}$ 는 나사면의 겹보기 마찰계수, $\mu'_w = \mu_w \frac{V_r}{V_0}$ 는 자리면의 겹보기 마찰계수로 $\mu_s > \mu'_s$ 이고, $\mu_w > \mu'_w$ 이므로 $Q'_f > Q_f$ 이다. 따라서 진동을 가하면 체결력이 커짐을 알 수 있다.

3. 실험 과정

3-1. 실험장치

실험장치는 너트러너와 세비타가 사용 되었다. 너트러너는 볼트를 체결할 때 일정한 토크에 도달하면 볼트의 체결을 멈추는 기능을 가졌고, 세비타는 좌우 진동을 가할 수 있는 장치이다. 너트러너의 경우 토크는 최대 40 Nm까지 낼 수 있고 오차율은 5%이내이다. 그리고 세비타의 경우 스트로크는 3 mm이고 최고 분당 7000회의 왕복수와 직진 추력 6.3 kgf, 후진 추력 4.7 kgf를 가지고 있는 장치이다. 가진장치의 gab은 2 mm를 주었다. Fig. 4는 실험장치중 jig를 간단히 나타내었다. 지그 양 옆의 리니어가이드의 경우 볼트 체결시 위의 판이 옆으로 회전하여 좌우에 마찰이 발생

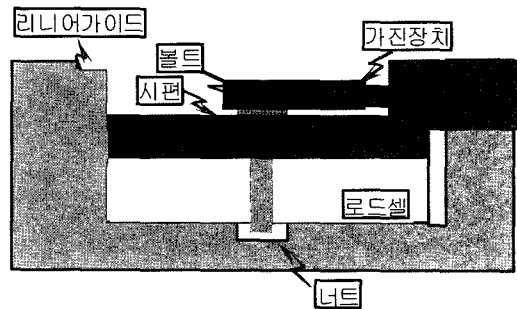


Fig. 4. Simple experimental device (jig).

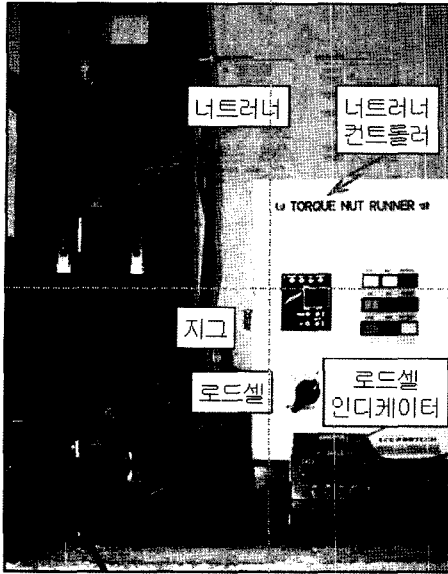


Fig. 5. Total experimental device.

Table 1. Experimental item

구분	볼트/너트	토크	시편재료
값	M6(스테인리스)	2 Nm	S45C

하여 로드셀에 나타나는 수치 차이가 나는 것을 방지하기 위해 설치 하였다. 로드셀은 2000 Kg까지 측정이 가능한 장치이고 1 Kg씩 수치가 변화하게 되어있다. Fig. 5는 실험장치의 전체 사진이다.

3-2. 실험조건

실험조건은 Table 1에서 잘 보여준다. 볼트와 너트, 그리고 시편의 경우는 실험시 마다 교체를 해주고 나머지 조건들은 일치하게 실험을 한다. 볼트의 경우 M6의 스테인리스강의 일반 시중에서 사용되는 볼트를 사용하였다. 실험은 탄성영역에서의 체결력 평가가 목적이므로 볼트의 항복 강도는 넘기지 않는 토크에서 실험을 위해 2 Nm로 정하였다. 볼트의 항복강도는 415 MPa이고, 시편재료는 S45C로 일반 강철을 재료로 하였고 항복강도는 480 MPa이다.

3-3. 실험방법

실험은 두 가지로 나누어서 진행 하였다. 일반적인 토크에서의 체결력을 측정하기 위해 진동을 제외한 체결 실험과 진동 효과를 위한 체결력 측정 실험을 하였다. 진동을 주는 것을 제외한 나머지 조건들은 일치시



Fig. 6. Experimental process.

켰다. 실험방법은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 시편/볼트, 너트 세척 후 지그에 결합 그리고 체결 뒤 결과 확인 순으로 진행되었다. 진동실험은 이 과정에서 체결 전 진동 과정을 넣었다. 세척의 경우 초음파 세척기를 이용한 세척을 하였고, 실험 장비가 모두 동일한 조건에서 실험이 되기 위해 세척을 하였다. 세척 후 한 시간에서 두 시간 정도를 건조시킨 뒤 실험을 진행 하였다. 너트, 볼트/시편을 지그에 장착할 때에도 이물질이 묻히지 않게 하기 위해 노력하였다. 너트러너의 토크는 Table 1에서 보여준 것과 같이 2 Nm에서 실험을 진행하였다. 시편의 경우 한번 실험후 교체를 하였는데 실험을 하고 나면 시편에 마멸이 일어나 여러 가지 오차를 줄 수 있기 때문이다. 그리고 진동의 경우 컴프레서의 압력을 7 Mpa로 고정하였다. 압력이 7 Mpa일 시 진진시 추력은 약 5.5 kgf/cm²이고, 후진시 추력은 4.2 kgf/cm²이다. 진동의 세기도 큰 오차를 줄 수 있기 때문에 컴프레서의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 노력하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 진동에 의한 체결력 증가

Fig. 7은 진동과 무진동 실험에서의 결과의 평균과 표준편차를 나타내었다. 무진동 에서의 체결력은 토크

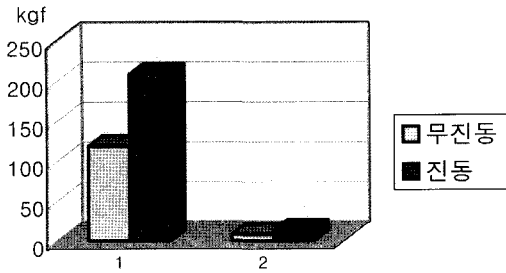


Fig. 7. Test result.

2 Nm에서 118.2 kgf 가량이 나왔고 편차는 8.23 kgf(오차율 6.96%)이다. 진동에서는 체결력이 207.9 kgf가 나왔으며 편차는 13.08 kgf(오차율 6.29%)가 나왔다.

4-2. 마찰계수 변화에 관한 평가

무진동시 보다 진동시 체결력이 증가한 것을 위의 결과에서 확인할 수 있었다. 진동을 가하였을 때, 지그에 다른 어떤 요인이 작용하였을 지는 정확히 확인하기 힘들지만 볼트 머리가 좌우로 흔들린다는 사실은 알 수 있었다. 그리고 체결력 증가의 경우는 나사산이 진동의 효과가 없다고 가정한다면, 즉 나사산의 마찰계수 변화가 없이 진동과 무진동의 것이 같다고 보고 볼트 머리의 언더헤드부의 마찰계수가 변화 하였다고 생각하였다. 그 경우 실험에서 나온 체결력을 참고로 마찰계수를 계산하였다. 식 (1)에서 나머지의 값들은 모두 일반적으로 알 수 있는 값들이고 의 경우 초음파 세척에 의한 무윤활 실험이므로 0.15 정도로 가정하였다. 그 경우 식에서 볼트 머리의 마찰계수를 계산 하였을 때, 무진동의 경우 0.272가 나왔고, 진동 실험의 경우 0.089가 나왔다. 조건 중에서 체결력만 바꾸고 나머지의 조건은 동일하게 계산하였기 때문에 정확하지는 않지만 마찰계수가 상당히 줄어들어서 나왔다. 물론 진동시 나사산의 마찰계수에도 영향이 있을 수 있

으나 정확한 고려가 어려우므로 무진동시와 진동시의 나사산 마찰계수는 같다고 가정했다.

5. 결 론

진동에 의한 마찰계수 감소에 대한 실험을 진행하였다. 실험 조건을 진동을 가한다는 조건을 빼고 두 가지의 실험을 동일하게 주고 실험을 진행하였고, 체결력 값의 차이를 비교하였다. 실험결과 같은 토크에서 진동을 가하였을 경우 체결력이 약 75% 정도 증가하였음을 알 수 있었다. 표준편차의 경우도 수치는 진동 실험이 컸으나 오차율을 비교하면 비슷하게 나왔다. 마찰계수 값을 대략 계산해 보아도 상당히 줄어든 값이 계산된 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 손승요, 신근하, 김영구, "나사 기술 총람," 문운당, 1995.
2. K. Ikeda, G. Nakagawa and K. Mitunaga, "Tightening of Bolts," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 2, pp. 1735, 1970.
3. T. Sakai, "Coefficient of Friction for the threaded fastener," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 43, No. 7, pp. 370, 1977.
4. I. Yoshimoto, K. Maruyama and H. Hasegawa, "Comparison of Control Methods for Screw Tightening," *J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 44, No. 2, pp. 204, 1978.
5. William. A. McNeill, "An Integrated Approach to Bolted Joint Design to Obtain Targeted Clamp Loads," SME Paper, AD 86-881, 1986.
6. J. H. Bickford, "An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints," 2nd ed., Marcel Dekker, 1990.