체결력 산포와 마찰계수의 감소를 위한 가진기의 진동량 변화 실험

이금강[†] · 문석만 · 조용주^{*}

부산대학교 기계공학부

An Experimental Study of Vibrator Amplitude Change for a Clamping Force Dispersion and Friction Coefficient Decrease

Geumgang Lee[†], Seokman Moon and Yongjoo Cho^{*}

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received June 7, 2011; Revised September 25, 2011; Accepted October 5, 2011)

Abstract – The object of this experimental study is to investigate influences of vibrator amplitude on clamping force in vibration for bolted joint. The experiment is that change the vibrator amplitude to check clamping force, also the friction coefficient calculated by equation to use an obtained in experiments. The main purpose of generation vibrations is decreasing the clamping force dispersion, also If vibration occurs while tightening the bolt is reduced coefficient of friction. In this paper, In experiments to measure the clamping force before vibrator's amplitude changing. Vibrator's amplitude changes to 5.5mm from 4.4mm. As a result, under various vibration condition, relationship of clamping force and Vibrator amplitude.

Keywords – clamping force(체결력), friction coefficient(마찰계수), fastener(체결기), dispersion(산포), vibrator amplitude(가진기 진동량)

1. 서 론

볼트는 대부분의 기계 구조물에 사용되고 있는 기계 요소로서 설계단계부터 견디야 할 인장력이나 외부 작용력이 고려되어 볼트의 크기나 체결력을 선정한다[1]. 볼트를 체결할 때 설정된 목표체결력에 미치지 못하면 풀림의 발생으로 인하여 구조물의 파손 또는 기능의 상실을 일으킬 수 있기 때문에 볼트의 체결력 유지 및 향상은 중요하다[2]. 하지만 볼트의 체결력을 향상시키기 위해서 토크를 높이면 볼트의 허용강도를 초과하여 볼트의 파손을 가져올 수 있으므로 볼트의 손실 없이 체결력을 향상시키기 위한 연구는 계속되어 왔다.

볼트의 허용강도 이내에서 체결하는 방법은 여러 가

지가 있지만 그 중에서 가장 널리쓰이는 것이 토크법이다[3]. 허용강도를 넘어서는 소성역 체결법은 그 체결법이 간단하고 한번 체결하면 잘 풀리지 않는 장점이 있지만 반대로 잦은 진동이나 부식으로 교체가 필요한 부분일 때 그것의 교체가 힘들고 체결체에 크랙 등의 변형을 주기 때문에 체결되는 곳 주위부분에 약화를 가져오게 된다. 그래서 체결과 풀림이 용이하고 교체가 비교적 쉬운 토크법을 사용하여 체결할 때 풀림현상이 적고 체결이 오래갈 수 있는 연구를 수행하려 한다. 이전의 연구에서는 토크법을 사용하여 볼트를 체결할 때 진동을 가하여 마찰력을 감소시킴으로써 체결력이 향상되는 결과[4]를 볼 수 있었다.

본 연구에서는 앞서 연구에서 수행했던 연구의 결과를 토대로 하는데, 가진기의 진동량을 변화시키는 실험을 하여 진동량의 변화에 따라 체결력의 산포와 볼트

[†]주저자 : homi83@pusan.ac.kr

^{*}책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

Fig. 1. Thread torque and bearing surface torque.

Fig. 2. Equilibrium of forces in the screw thread.

헤드부분의 마찰계수에 미치는 영향에 대해 알아보는 것에 그 목적이 있다.

2. 이 론

2-1. 체결토크와 체결력의 관계

체결토크는 Fig. 1에 나타나는 것과 같이 나사의 리드를 이용하고 3각나사인 볼트로 피체결체를 체결할 때 발생하는 볼트의 체결력 를 내기 위한 체결토크는 나사면토크와 자리면토크로 나눌 수 있다[5].

$$T_f = T_s + T_w \quad (1)$$

나사면토크는 볼트와 너트사이에 작용하는 토크로 다음과 같다.

Fig. 3. Explanation of vibrated effect.

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

여기서 P 와 d_2 는 각각 나사의 피치와 나사의 유효지름을 뜻하고, U_s 는 접선력, μ_s 는 나사면마찰계수, α' 은 나사산 직각단면에서의 프랭크 각이다.

한편 자리면토크는 너트의 자리면과 피체결체와 사이에 작용하는 토크이며 체결력과 관계는 다음으로 표시된다.

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

여기서 μ_w 는 자리면마찰계수이고 D_w 는 자리면토크의 등가지름이다. 식 (2)와 (3)를 식 (1)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다[6].

$$T_f = \frac{Q_f}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu_w D_w \right) \quad (4)$$

2-2. 진동효과

Fig. 3-①과 Fig. 3-②는 물체의 상태도이며, Fig. 3-③은 원리 상태도로서, 이를 상세히 설명하면, Fig. 3-①에서와 같이, 볼트헤드가 수직 접촉력 N 을 받으면서 속도 $\vec{v}_r$ 로 움직이고자 할 때 마찰 저항은 $F_r = F_0 = \mu N$ 이고(N : 수직 접촉력, μ = 마찰계수) 마찰력 방향은 속도 $\vec{v}_r$ 와 반대 방향이다.

Fig. 3-②에서와 같이 $\vec{v}_r$ 의 수직 방향으로 진동을 가하여 임의의 순간의 진동속도가 $\vec{v}_0$ 라면 Fig. 3-③과 같이 물체의 순간속도는 $\vec{v}_0 = \vec{v}_r + \vec{v}_v$ 이고, 마찰력 방향은 $\vec{v}_0$ 의 반대 방향으로 나타나며, 그 크기는 μN 이다. Fig. 3-③에서 움직이고자 하는 $\vec{v}_r$ 방향 반대방향으로 마찰력이 생기는데 이때의 마찰력을 나타내면,

$$F_r = F_0 \frac{V_r}{V_0} = \mu \frac{V_r}{V_0} N = \mu' N \quad (5)$$

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

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

겉보기 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 체결 시 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.

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

$$Q_f' = \frac{2T_f}{\left(\frac{P}{\pi} + \mu_s' d_2 \sec \alpha' + \mu_w' D_w\right)} \quad (8)$$

$$\frac{Q_f'}{Q_f} = \frac{\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu_w D_w}{\frac{P}{\pi} + \mu_s' d_2 \sec \alpha' + \mu_w' D_w} \quad (9)$$

여기서 $\mu_s' = \mu_s V_r/V_0$ 는 나사면의 겉보기 마찰계수, $\mu_w' = \mu_w V_r/V_0$ 는 자리면의 겉보기 마찰계수로 $\mu_s > \mu_s'$ 이고, $\mu_w > \mu_w'$ 이므로 $Q_f' > Q_f$ 이다. 따라서 $\mu_w > \mu_w'$ 이므로 진동을 가하면 체결력이 커짐을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

실험장치는 너트러너(Nut runner)와 세비타(Sevita)가 사용 되었다. 너트러너는 볼트를 체결할 때 일정한 토크에 도달하면 볼트의 체결을 멈추는 기능을 가졌고, 세비타는 좌우 진동을 가할 수 있는 가진장치이다. 너

Fig. 4. Test equipment for vibration experiment.

트러너의 경우 토크는 최대 40 Nm까지 낼 수 있고 오차율은 5% 이내이고 세비타의 경우 스트로크는 3 mm이고 최고 분당 7000회의 왕복수와 직진 추력 6.3 kgf, 후진 추력 4.7 kgf를 가지고 있는 장치이다.

지그 양 옆의 리니어가이드의 경우 볼트 체결시 위의 판이 옆으로 회전하여 좌우에 마찰이 발생하여 로드셀에 나타나는 수치 차이가 나는 것을 방지하기 위해 설치 하였다. 로드셀은 볼트가 체결될 때 체결력을 측정하기 위한 장치로써 2000 Kgf까지 측정이 가능하고 1 Kgf씩 수치가 변화하게 되어있다. 가진기의 진동량 변화는 세비타의 진동부에 우레탄실을 이용하여 변경시켰다. Fig. 4는 실험장치 중 지그(Jig)와 가진기(Vibrator)부분을 나타낸 것이다.

3-2. 실험방법

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 실험장치를 도식화하여 나타내고 있다. 실험장치에 대해 설명하자면, 가진기의 앞부분에 볼트헤드부에 진동을 줄 수 있게 사각틀을 가진 부품을 설치하여 체결시 진동이 가능하게 했다. 체결력을 받는 부분인 지그(Jig)부분 사이에 로드셀(Load cell)을 설치하여 진동중인 볼트가 체결될 때 체결력의 변화를 측정하게 했다[7]. 실험에서 체결토크는 가진기의 진동량의 변화에 대한 체결력 측정 실험이므로 항복강도 이하에서 작용하는 토크인 2 Nm로 고정시키고 가진기 진동량 변화만 주었고, 진동량의 크기는 4.4 mm, 4.7 mm, 5.2 mm, 5.5 mm의 4가지 실험조건으로 실험을 수행하였다. 가진기의 공압은 6 MPa로 설정하였다. 실험에 사용한 볼트와 너트는 M6

Fig. 5. The experimental device setup.

Fig. 6. The process for vibrating test.

스테인리스재료로 항복강도는 415 MPa이고, 볼트가 진동하면서 마찰을 일으키게 되는 지그부분은 시편을 사용하여 진동실험을 한번 실행 할때마다 바꾸어 주어서 동일한 표면상태에서 진동하도록 하였다. 시편의 재료는 일반적인 S45C를 사용하였고, 시편재료의 항복강

Fig. 7. Relationship between clamping force standard deviation and vibrator amplitude.

도는 480 MPa이다.

Fig. 6은 실험의 진행순서를 나타낸 것이다. 처음에 볼트, 너트, 시편을 초음파 세척기를 이용해 세척해 주고, 1시간 정도 건조시킨다. 실험장치 제일 밑에 너트를 삽입하고 그 위에 로드셀을 장착시킨다. 그 다음에 지그에 시편을 넣고 고정시킨 후 시편의 구멍부분에 볼트를 넣어서 너트와 접촉시킨다. 그 상태에서 너트 러너를 볼트헤드부에 장착하고 가진기를 진동시킨 후 너트러너를 작동시켜 볼트를 너트에 체결한다. 체결이 끝나면 로드셀을 통해 체결력을 확인하고 볼트, 너트, 시편은 교체하여 다음 실험을 한다. 이 과정을 30번 반복한 후에 가진기의 진동량을 쉼을 이용해 변경한 후 같은 순서로 실험을 반복하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 체결력 산포변화

Fig. 7은 4가지의 가진기 진동량변화에 대해 체결력의 평균을 나타낸 것이다. 여기서 볼 수 있듯이 가진기의 진동량이 커질수록 체결력의 평균 또한 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 높은 체결력을 얻기 위해서는 가진기의 진동량을 증가시켜야 한다는 것을 보여주고 있다. 체결력 평균의 변화를 Table 1에 정리하였다.

Fig. 8은 Fig. 7의 데이터를 이용해 체결력의 산포 σ 에 대해서 나타낸 그래프이다. 여기에서는 4.4와 4.7 mm의 진동량에서는 19.37과 20.48로 20에 가까운 산포를 5.2와 5.5에서는 각각 13.49와 14.77의 산포를

Table 1. Average clamping force on vibrator amplitude

Vibrator Amplitude(mm)	Clamping Force(kgf)
4.4	60
4.7	96.3
5.2	112.5
5.5	124.1

Fig. 8. Relationship between clamping force standard deviation and vibrator amplitude.

보였다. 이 결과에서 가진기의 진동량이 작은 상태에서는 체결력의 산포가 비교적 높고 진동량이 큰 상태에서는 진동량이 작을 때 보다 상대적으로 낮은 산포값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 진동량의 변화가 가진기의 진동속도에 영향을 미쳐 볼트헤드부에 더 많은 진동을 가해주어 산포의 감소에 영향을 주는 것으로 사료된다.

이같은 경향은 산포를 각각의 평균으로 나눈 값 σ/m 을 보면 두드러진다. σ/m 은 평균에 대해 실험치들이 퍼져있는 정도를 분석하기 좋은 데이터이다. Table 2는 진동량에 대해 σ/m 의 값을 나타낸 표이다. 여기서 보면 진동량이 4.4 mm에서 5.5 mm로 증가하면서 σ/m 값이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것 역시 진동량의 증가가 체결력 산포의 감소에 영향을 주는 것을 보여준다.

4-2. 자리면마찰계수의 변화

실험에서 직접적으로 진동이 가해지지 않은 나사산 부분에 진동의 효과가 없다고 가정하고, 나사면마찰계수 변화는 없고 자리면마찰계수만 변화했다고 가정하였다. 이 가정을 바탕으로 볼트진동실험에서 나온 체

Fig. 9. Change in the coefficient of friction.

결력을 이용해 마찰계수를 계산하였다. 나사면마찰계수는 일반적인 볼트·너트 체결시 마찰계수 값인 0.15를 사용하였고, 계산식에 사용되는 볼트의 재원은 M6 보통나사에서 사용했다.

Fig. 9는 실험을 통해 측정된 체결력 데이터를 식(4)에 적용하여 자리면마찰계수의 변화에 대해 나타낸 것이다.

여기서 보면 자리면마찰계수는 4.4 mm의 진동일 때 0.0682의 값을 나타냈고, 4.7 mm에서는 0.0367, 5.2 mm는 0.0292, 진동량이 가장 큰 5.5 mm에서는 0.025의 낮은 마찰계수 값을 보였다. 이 결과에서 가진기의 진동량이 커질수록 마찰계수도 작아지고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 볼트를 체결할 때 헤드부에 진동을 가하는 실험을 하여 가진기의 진동량의 차이에 따라 볼트의 체결력과 마찰계수에 미치는 영향을 미치는지 파악하기 위한 목적으로, 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 체결력과 가진기의 진동량의 관계에서 진동량이 체결력의 산포에 미치는 영향을 확인하였다. 진동량이 증가할수록 체결력의 산포가 감소하는 경향을 보여주어 안정적인 체결력을 확보하는 방법을 제시하였다.
2. 실험치를 바탕으로 진동량에 따라 자리면마찰계수가 변화하는 것을 보여주었다. 나사면마찰계수를 가정하여 진동량이 커질수록 자리면마찰계수가 감소하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. N.G. Pai and D. P. Hess, "Experimental Study of Loosening of Thread Fasteners due to Dynamic Shear Loads", *Journal of sound and Vibration*, Vol. 253, No. 3, pp. 585-602.
2. S. Basava and D. P. Hess, "Bolted Joint Clamping Force Variation due to Axial Vibration", *Journal of sound and Vibration*, Vol. 210, No. 2, pp. 255-265, 1998.
3. J. H. Bickford and S. A. Nassar, "Handbook of Bolts and bolted Joints", *MarcelDekker*, 1998.
4. 조용주, 송창규, 이상돈, "볼트 체결시 진동에 의한 마찰계수 변화에 관한 실험", *윤활학회지*, 제23권, 제2호, pp. 61-65, 2007.
5. S. A. Nassar, E. El-Khiamey, G. C.Barber, Q. Zou, and T. S. Sun, "An Experimental Study of Bearing and Thread Friction in Fasteners", *Journal of Tribology*, Vol. 127, pp. 263-272, 2005.
6. 손승요, 신근하, 김영구, "나사 기술 총람", *문운당*, 1995.
7. 이상돈, 이금강, 조용주, "체결력 산포 저감을 위한 볼트 진동 체결기법 개발", *한국정밀공학회 2010년도 춘계학술대회논문집*, pp. 417-418, 2010.