

# 진동에 의한 볼트 체결력 증가에 관한 연구

## n perimental tud for olted oint load increase due to vi ration

\*송창규<sup>1</sup>, #이상돈<sup>2</sup>, 조용주<sup>3</sup>

\*C. K. Song(gomdoli99@pusan.ac.kr)<sup>1</sup>, #S. D. Lee(bsd1975@pusan.ac.kr)<sup>2</sup>, Y.J.Cho(yjcho@pusan.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 정밀기계공학과, <sup>2</sup>부산대학교 정밀기계공학과, <sup>3</sup>부산대학교 기계공학부

Key words : fastener, torque, friction, vibration

### 1. 서론

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 내부 마찰과 함께 전단하중에도 저항할 수 있는 역할을 담당한다. 또 조여진 물체의 압축력과 외부에서 작용되는 하중진동을 흡수하여 변동 피로하중으로부터 체결요소를 보호하는 능력을 가진 기계요소로서 이러한 볼트 관련기술은 전체 기계시스템의 성능과도 직결되는 기술이라 할 수 있으며 따라서 기계시스템에 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 소성영역에 도달해 있음으로 인해 발생하는 여러가지 문제점들 때문에 엔지니어나 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 진동에 의한 체결력의 증가와 산포에 관한 영향을 파악하는데 있다. 진동의 경우 한쪽으로부터 진동하는 경우와 교차 진동의 두 가지에 대한 실험을 하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 체결토크와 체결력과의 관계

Fig. 2.1에 보인 것처럼 체결용 1줄 3각 나사로 된 볼트로 피체결물을 체결할 때 볼트의 축력  $F_f$ 를 내기 위한 체결토크  $T_f$ 는 나사면토크  $T_s$ 와 자리면토크  $T_w$ 로 나눌 수 있다. 즉, 다음과 같은 관계식이 성립하는데,

$$T_f = T_s + T_w = \frac{f}{2} \left( \frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu \right) = f d \quad (1)$$

여기서,  $P$  = 피치,  $s$  = 나사면 마찰 계수,  $d_2$  = 나사면 유효지름,  $d$  = 볼트의 호칭지름이며  $T_s$ ,  $T_w$ ,  $K$ 는 각각 다음과 같다.

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

$$T_w = \frac{f}{2} \mu \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2d} \left( \frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu \right) \quad (4)$$

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

#### 2.2 진동효과

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

Fig. 1-②에서와 같이  $\vec{v}$ 의 수직 방향으로 진동을 가하여 임의의 순간의 진동속도가  $\vec{v}'$  라면 Fig. 1-③과 같이 물체의 순간 속도는  $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}$  이고, 마찰력 방향은  $\vec{v}$ 의 반대 방향으로 나타나며, 그 크기는  $\mu N$ 이다. Fig. 1-④에 나타낸 바와 같이 움직이고자 하는 방향  $\vec{v}$  방향의 마찰력,

$$F_r = \mu N - \mu N' = \mu' N \quad (5)$$

여기서  $\mu' = \sqrt{v'^2 + v^2}$  이고  $\mu'$ 은 겉보기 마찰계수로 다음과 같다.

$$\mu' = \mu \frac{N}{\sqrt{v'^2 + v^2}} = \mu \frac{1}{\sqrt{1 + (v'/v)^2}} \quad (6)$$

겉보기 마찰계수  $\mu'$ 은 진동속도  $v'$ 가 빨라질수록 원래 마찰계수  $\mu$ 보다  $1/\sqrt{1 + (v'/v)^2}$ 의 비율로 작아짐을 알 수 있다.

따라서 움직이고자 하는 방향으로 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  $f$ 와  $f'$ , 그리고 이 둘의 비율은 다음과 같다.

$$f = 2T_f \left( \frac{1}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu \right) \quad (7)$$

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

$$\frac{f'}{f} = \frac{\frac{1}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu}{\frac{1}{\pi} + \mu_s' d_2 \sec \alpha' + \mu'} \quad (9)$$

여기서  $\mu_s' = \mu_s$ 는 나사면의 겉보기 마찰계수,  $\mu' = \mu$ 는 자리면의 겉보기 마찰계수로  $\mu_s > \mu_s'$  이고,  $\mu > \mu'$  이므로  $f' > f$ 이다. 따라서 진동을 가하면 체결력이 커짐을 알 수 있다.

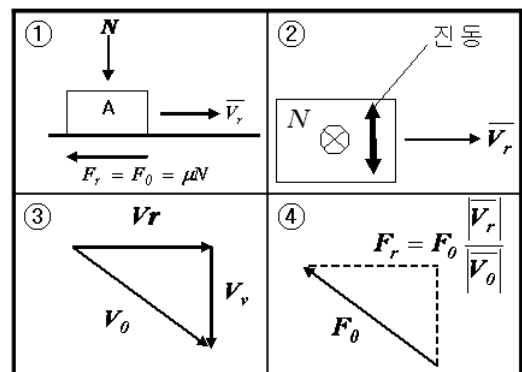


Fig.1 explanation of vibrated effect

### 3. 실험조건

실험조건은 모든 실험에서 동일하게 적용한다. 볼트와 너트, 그리고 시편의 경우는 실험시 마다 교체해 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 2Nm로 정하였다. 볼트의 항복강도는 415MPa이고, 시편재료는 S45C로 일반 강철을 재료로 하였고 항복강도는 480MPa이다.

실험은 무진동 실험과 진동 실험을 하였고, 진동의 경우 두 가지 방법으로 진행하였다. 한 가지는 fig. 2와 같이 한 방향으로 하였고, 나머지 한 가지는 위쪽에 하나의 가진장치를 더 설치하여 교차로 진동을 동시에 주었다. 무진동, 한방향 진동, 교차 진동 세 가지의 방법으로 두 가지 조건(무세척/세척)에서 실험을 진행하였다. 무 세척은 시편은 가공되어 나온 그대로의 상태이고 볼트와 너트는 시중에서 사온 상태 그대로 바로 실험을 하였고, 세척 실험은 95% 에탄올을 가지고 초음파 세척을 하였다. fig. 3에서 실험 방법에 관한 진행과정을 나타내었다.

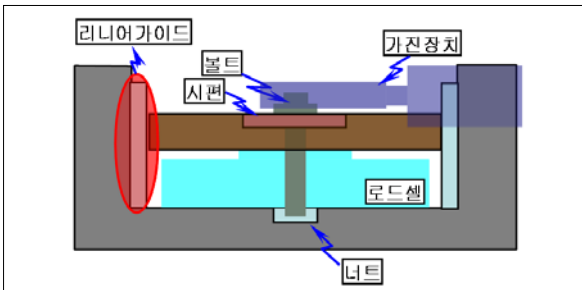


Fig. 2 Simpld experimental device (jig)

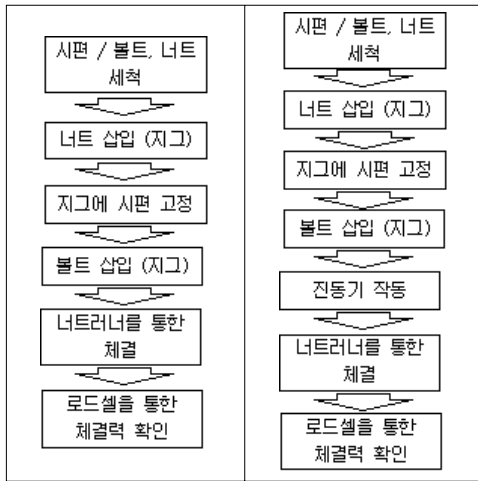


Fig. 3 Expental process

### 4. 실험결과 및 고찰

실험은 각각의 경우에 대하여 20회씩 진행하였고 모든 실험을 하루에 진행하였다. fig. 4는 체결력의 평균값을 나타내었고, fig. 5는 그 체결력들의 편차율들을 나타내었다.

체결력의 경우 무세척 실험의 경우는 무진동에서 보다 단일진동에서는 81%정도 증가하였고, 교차진동에서는 65% 정도 증가하였다. 세척한 후 실험한 경우에는 단일진동 57%, 교차진동 47% 증가하였다. 편차율의 경우에는 무세척 실험에서는 단일진동 19%, 교차진동 27% 감소하였고, 세척 실험에서는 단일진동 26%, 교차진동 32%가 감소하였다. 무세척 실험은 시편의 경우 공장에서 가공되어 나온 상태 그대로 사용하였고, 볼트와 너트는 구입한 후 바로 실험에 사용하였다. 볼트와 너트의 경우는 눈에 띄는 다른 점은 없었으나 시편에는 가공할 때 묻은 절삭유 때문에 볼트와 시편이 접하는 표면이 윤활상태가 되어 체결력이 전체적으로 높게 나타났다. 단일진동의 체결력이 교차진동의 체결력보다

다 값이 많이 나왔는데 그 이유는 컴프레서의 공압을 가지고 진동기를 작동시키는데 단일진동은 하나의 가진기만 작동시키지만 교차진동은 같은 공압을 둘로 나누어서 가진을 가해주기 때문에 낮은 체결력이 측정되었다.

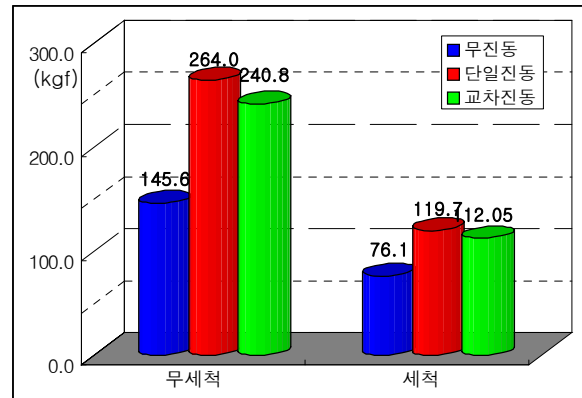


Fig. 4 clamp load average

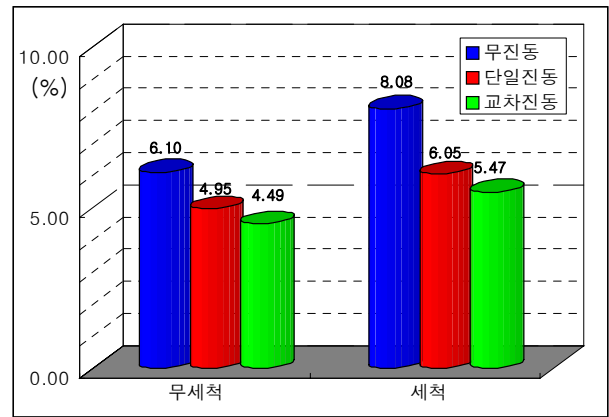


Fig. 5 clamp load deviation rate

### 결론

진동이 볼트의 체결력에 미치는 영향을 실험을 통해 알아보았다. 그 결과 볼트의 체결시 진동에 의해 단일진동과 교차진동에 의해서 체결력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

하나, 무세척시 무진동보다 진동에서 대략 70% 정도 증가된 결과를 보였다. 둘, 세척시에서는 무진동보다 진동에서 대략 50% 정도 증가된 결과를 보였다. 셋, 세척을 했을 때보다 무세척시 진동을 가했을 경우 체결력이 증가된 결과를 보였는데 결국 윤활 상태의 경우에도 진동 실험에 영향을 미친다는 것을 보인다.

단일진동이 교차진동보다 체결력이 높게 나타난 것을 확인할 수 있었는데 그 차이는 진동을 가하는 가진기에 들어가는 공압의 차이 때문에 나타났다. 전체적으로 진동에 의해 체결력은 상승하였다.

### 참고문헌

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