

볼트결합부 횡방향 강성의 실험적 연구 Experimental Study of Lateral Stiffness for Bolt Joint

*.#이재학¹

*.#Jae Hak Lee(jaehak76@kimm.re.kr)¹

¹한국기계연구원 초정밀기계시스템연구실

Key words : Bolt Joint, Lateral Stiffness, FEM

1. 서론

반도체 장비 및 공작기계와 같은 초정밀 기계장비들은 수많은 볼트결합부로 체결되어 있으며 일반적인 FEM 해석 시 완전 결합이 되어 있어 상대 변위가 발생하지 않는다고 가정하고 해석을 수행한다. 정적 해석의 경우 볼트결합부는 면과 면이 접해있으므로 완전한 결합부로서 가정이 가능하지만 동적 해석의 경우 볼트결합부가 압축하중만이 작용하는 것이 아니라 장비 요소의 굽힘 및 장력이 작용하므로 볼트결합부에서 상대 변위가 발생하게 되므로 볼트결합부의 강성을 고려해야만 정확한 정밀도를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 볼트결합부를 기존 연구를 통해 구한 종방향 강성을 이용하고 횡방향 강성이 실제 기계 정밀도에 미치는 영향을 FEM을 이용하여 평가하였으며 횡방향 강성을 이론식과 실험을 통해 계산하고 해석에 적용하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 볼트결합부 횡방향 강성 모델링 및 실험적 튜닝 방법

Fig. 1은 일반적인 볼트결합부의 횡하중 작용 시 거동을 나타내고 있으며 횡방향 하중이 P_1 이하에서는 볼트결합부에 미끄러짐이 발생하지 않아 하중이 제거되면 원래 상태로 되돌아온다. 하중이 증가하여 횡방향 하중이 P_1 보다 크고 P_2 보다 작은 경우 member와 flange 사이에 slip이 발생하여 상대 변위가 발생하지만 볼트헤드 및 너트부와 member 및 flange 사이의 접촉부는 slip이 발생하지 않아 볼트의 위치를 고정하고 있어 하중과 횡방향 변위 곡선이 선형성을 갖는다. 하중이 더 증가하여 P_2 이상이 되면 볼트와 피결합부분에서도 slip이 발생하여 횡방향 하중-

변위 관계가 비선형성을 보인다.

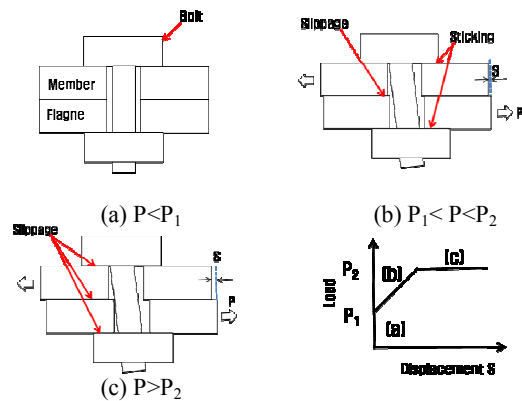


Fig. 1 Bolt joint behavior with respect to different lateral load

일반적으로 공작기계와 같은 가공 장비의 경우 각 결합부의 강성을 크게 설계하므로 Fig. 1 (a)와 Fig. 1 (b)의 경우가 대부분이므로 볼트결합부의 횡방향 변위는 선형적으로 발생한다는 가정이 가능하다. 따라서 볼트결합부를 단순 빔모델로 가정하고 횡방향 변위를 이론식으로 표현할 수 있다..

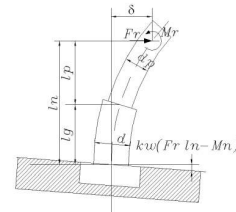


Fig. 2 Free body diagram of simplified bolt joint

Fig. 2 는 볼트결합부를 단순 빔모델로 단순화시킨 free body diagram 을 나타내고 있다. 총횡방향 변위는 크게 횡방향 하중(F_r)에 의한 횡방향 변위(δ_F), 볼트헤드와 너트의 반력 모멘트(M_n)에 의한 횡방향 변위(δ_M), 볼트의 굽힘에 의해 발생하는 횡방향 변위(δ_θ)의 합으로 표현가능하고 총변위를 식으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_F + \delta_M + \delta_\theta \\ &= F_r \left(\frac{l_g^3}{3E_b I_g} + \frac{l_p^3}{3E_b I_p} + \frac{l_g l_p l_n}{E_b I_g} + k_w l_n^2 \right) \\ &\quad - M_n \left(\frac{l_g^2}{2E_b I_g} + \frac{l_p^2}{2E_b I_p} + \frac{l_g l_p}{E_b I_g} + k_w l_n \right) \\ M_n &= \frac{C_1 F_r}{8} \times \frac{d^2 + d_n^2}{d} \end{aligned}$$

실험을 통해 하중에 따른 횡방향 변위를 계산하여 이론식과 비교하면 계수 C_1 을 찾을 수 있으므로 이론식을 이용하여 볼트체결력에 따른 볼트결합부의 횡방향 강성을 쉽게 계산할 수 있다.

3. 횡방향 강성을 고려한 FEM 해석

Fig. 3 은 볼트결합부의 FEM 해석을 위한 모델로 횡방향 강성의 영향을 확인하기 위해 횡방향 강성을 고려하지 않고 종방향 강성만 고려한 1D 결합부, 횡방향 강성을 고려한 2D 결합부, 그리고 완전히 결합되어 있다고 가정한 완전 결합부 3 가지로 모델링하여 해석을 수행하였다.

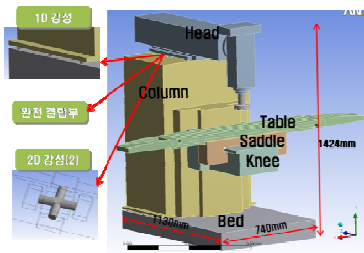


Fig. 3 FEM model

모든 재료는 SM45C 로 가정하였으며 볼트결합부의 축방향 강성은 기존 연구 결과를 이용해 M12, 체결력 35kN 일때 30N/ μ m로 가정하였으며 관찰하기 쉽도록 실제 장비의

경우보다 강성이 작도록 모델링하였다.

4. 해석 결과

Fig. 4 는 모달해석 결과를 보여주고 있으며 볼트결합부를 종방향강성만으로 모델링한 경우 횡방향으로 변위가 크게 발생하여 비물리적인 거동을 보였다. 이에 비하여 횡방향강성을 고려한 2D 강성 모델의 경우 장비의 헤드 부분에서 변형이 가장 큰 것을 알 수 있다. 볼트결합부를 완전 결합으로 가정한 경우 높은 고유 진동수를 갖으며 테이블에서 가장 큰 변형이 발생함을 확인할 수 있지만 볼트결합부의 영향을 확인할 수 없다.

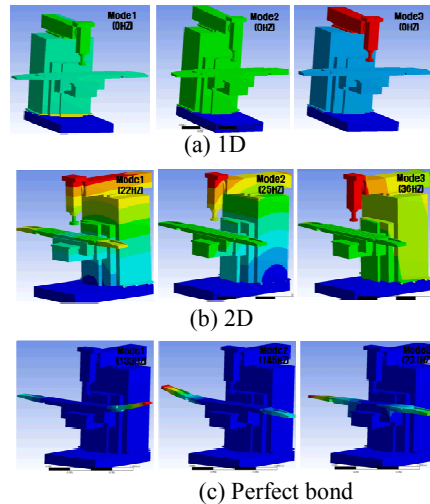


Fig.4 Modal analysis results

4. 결론

본 연구를 통하여 이론식과 실험을 이용한 볼트결합부의 횡방향 강성 계산에 대한 방법을 제시하였으며 FEM 해석을 통해 볼트결합부의 완전 결합부와 2D 강성 적용 시의 차이점을 비교 분석하였다.

참고문헌

1. Nishimura, N., Hattori, T., Mori, S., et al., "Loosening and Sliding Behavior of Bolt Nut Fastener under Transverse Loading," Journal of the Japan Society of Mechanical Engineering, **75**, 22-30, 2009