

볼트 결합부 풀림에 관한 마찰 특성 (제 I 보 : 나사 마찰 실험)

박태원 · 신귀수*[†] · Yanyao Jiang** · Ming Zhang**
전주공업대학 컴퓨터응용기계계열 · *벽성대학 자동차서비스과
**University of Nevada, Reno Mechanical Engineering
(2002. 11. 18. 접수 / 2003. 6. 12. 채택)

The Friction Properties on the Loosening of Bolted Joints (I : Thread Friction Experiments)

Tae-Won Park · Gwi-Su Shin*[†] · Yanyao Jiang** · Ming Zhang**
Department of Computer Basis applied Mechanics, Jeonju Technical College
*Department of Car Service, Byuksung College
**Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno
(Received November 18, 2002 / Accepted June 12, 2003)

Abstract : By using an approach developed to determine the torque-tension relationship for bolted joints, frictional properties of several typical bolted joints were studied experimentally. The specific property by bolted joints certify that the most significant influence of materials and bearing surface condition. Experiments on thread friction shows that prevailing torque nuts with distorted threads provide benefit for preventing self-loosening of the nut. Repeated tightening-loosening generally increases frictions in a bolted joint. It was noted that the data scatter of the experimental results of frictions in a bolted joint may overshadow the influence of size, speed, and contact positions. The results from the experimental investigation will help to better design bolted joints.

Key Words : frictional properties, thread friction, torque-tension relationship

1. 서 론

볼트 결합부는 기계 부품이나 구조물 그리고 화학 플랜트 등에서 작거나 큰 부분을 결합하는 요소로서 공업분야에서 널리 사용되고 있는 요소이다. 그러나 볼트-너트 체결체인 볼트 결합부는 결합초기에는 볼트에 충분한 인장력이 주어졌어도 운전중에 수반되는 충격, 진동, 열변동 등에 의하여 볼트 결합부의 인장력이 감소하거나 또는 너트 풀림으로 인하여 부품이 이완되어 자동차, 비행기, 교량 등의 파괴를 가져와 큰 인명피해를 유발하는 원인이 되고 있다. 이런 볼트-너트 체결체의 풀림은 오래된 문제이면서 현실적 문제이다. 따라서 이러한 볼트

결합부의 풀림을 방지하기 위하여 풀림의 메카니즘을 규명할 필요가 있다.

볼트 결합부의 풀림은 진동뿐만 아니라 충격을 받고 있는 장소에서도 발생하기도 하고, 고온의 영향을 받는 기계에서도 문제를 유발하고 있다. 볼트 결합부의 마찰특성은 구조물 설계에 아주 중요하다. 현재 볼트 결합부의 마찰 특성을 얻기 위하여 이론적인 시뮬레이션이 수행되고 있지만 아직까지는 실험적인 방법이 가장 믿음만 하고 현실적인 방법이다.

자동풀림에 대한 기구학적인 설명은 확실치 않으나 볼트 결합부의 여러 가지 특성중에서 마찰특성의 문제가 중요한 것은 확실하다. 그것은 나사산 사이의 마찰력이 너트를 풀려는 힘보다 크면 풀리지 않기 때문이다. 이러한 볼트 결합부에 대한 연구는 Junker¹⁾, Sakai²⁾, Kasei³⁾, Sase⁴⁾, Hori⁵⁾, Hosokawa⁶⁾ 등에 의해 많이 진행되고 있으나 모두의 방법들이

[†]To whom correspondence should be addressed.
ksshin@byuksung.ac.kr

정확하다고는 할 수 없다. 그러나 일치하는 것은 볼트 결합부에 외부의 기구학적인 작용에 의하여 나사산 사이에 존재하는 마찰력이 감소하거나 없어지지 않으면 볼트 결합부는 풀리지 않는다는 것이다.

본 연구에서는 나사 풀림의 원인과 풀림에 의한 장애 등을 고려하여 나사 마찰을 실험을 통해 직접 측정하여 볼트 결합부 풀림에 대한 마찰특성을 연구하였다.

2. 이론적배경

지금까지 진행되어온 볼트 결합부의 마찰특성에 대한 연구는 볼트를 조이면서 또는 조임과 풀림을 반복적으로 수행하면서 한 연구가 많다. 나사의 풀림은 진동, 충격과 열에 의해서 발생하는데 이중에 진동에 의한 풀림이 가장 많다. 이러한 진동에 의한 풀림 현상은 볼트 축과 직각 방향의 진동에 의해서 발생하는 경우가 가장 많다. 볼트를 조이기 위해서 필요한 토크는 다음 3가지로 크게 나눈다. (i) 볼트를 인장하기 위한 토크, (ii) 볼트 나사산의 마찰을 이겨야 하는 토크, (iii) 너트와 너트를 지지하는 표면사이의 마찰을 이겨야 하는 토크 등으로 되어 있다. 이것을 Nabil Motosh⁷⁾는 다음 식으로 표시하였다.

$$T = P \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_1 r_1}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1)$$

여기서 T 는 볼트 결합부에 작용하는 토크, P 는 체결부에 생기는 체결력 (예하중), p 는 나사 피치, μ_1 는 너트와 볼트 나사산 사이의 마찰계수, μ_n 는 너트와 결합부 표면이나 와셔와의 마찰계수, r_1 는 나사의 유효 반경, r_n 는 너트와 결합부 표면의 유효 반경이고 β 는 나사산 반각이다.

토크 제어법을 이용하여 예하중을 조절하기 위한 일반적인 관계는 적용 토크와 체결력에 의해 다음 식과 같이 표시 할 수 있다.

$$T = KDP \quad (2)$$

여기서 D 는 볼트의 직경, K 는 토크 계수이고 P 는 볼트 체결력이다.

식(2)에서 토크-체결력(T - P) 관계는 선형으로 가정된다. 토크계수 K 는 마찰계수 μ_1 , μ_n 를 알고 있다면 정해진다. 비선형적인 T - P 관계를 고려한다

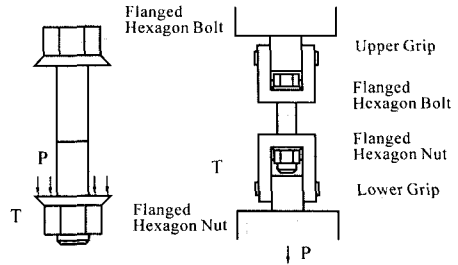


Fig. 1. Thread friction experimental setup

면, T - P 관계에 대한 좋은 표현식은 식(1)과 비슷한 식이 되고, 이때 K 는 체결력 함수이다.

나사마찰을 극복하는데 필요한 토크의 결정은 실험적으로 직접 구하였다. Brayer Levi⁸⁾는 체결력과 지지표면 마찰 그리고 나사마찰을 극복할 수 있는 토크를 별도로 측정하는 장치를 개발하였으며, 편심이나 지지표면의 경사로 말미암아 발생하는 굽힘 영향의 가능성을 극복하기 위하여 볼트 풀림의 기구학적인 조사와 설계를 개발하였다.

본 연구의 실험적인 결과들은 볼트 결합부의 마찰 특성을 고려한 실험적 접근법을 이용하여 여러 가지 전형적인 볼트 결합부의 볼트 마찰 특성에 대하여 나타내었다.

3. 실험

나사 마찰을 직접적으로 또는 독립적으로 측정하는 방법은 이미 개발되었다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치로서 나사 마찰을 측정하기 위하여 축하중 P 와 회전각을 적용할 수 있도록 두 개의 U자형 그립(grip) 장치를 설계하였다. 만능시험기(Instron)를 이용하여 축하중을 조절하고 측정할 수 있게 하였다. U자형 그립은 너트와 육각볼트 머리의 회전을 방지하고, 컴퓨터와 연결된 실험장치는 축하중에 비례하여 비틀림을 증가시키거나 감소시키면서 축하중을 선형적으로 증감할 수 있다. 이러한 방법으로 실제 볼트의 풀림과 조임의 상태와 나사의 상대운동을 유사하게 적용하였다. 축하중과 체결력, 토크 그리고 회전각들은 시험장치에 부착된 센서와 로드셀로 측정되어 진다.

순수한 나사만의 마찰식은 식(1)에서 다음과 같이 유도된다.

$$T = P \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_1 r_1}{\cos \beta} \right) \quad (3)$$

여기서 피치 p 와 나사의 $\frac{1}{2}$ 각 β 는 주어진 볼트에서 알 수 있고 나사 마찰계수 μ_1 는 실험에 의해 직접 구해진다.

4. 실험 결과 및 고찰

나사 마찰 실험은 축하중과 비틀림각이 선형적인 관계로 조절되면서, 나사의 마찰을 이기고 볼트의 인장에 필요한 토오크는 시험기의 로드셀에 의하여 측정된다. 본 실험에서는 M12×1.75 플랜지 육각볼트와 유기물을 코팅한 플랜지 육각볼트가 사용되었다.

Fig. 2는 유기물 코팅한 플랜지 육각 볼트와 너트의 토오크 T와 체결력의 관계이다. 그림과 식(3)을 이용하여 나사마찰 계수 μ_1 를 구할 수 있다. 그림에서 보여주는 것과 같은 체결력을 얻는데 필요한 토오크의 크기는 나사를 조일 경우가 나사를 푸는 경우보다 역시 크게 나타났다. 그리고 반복수가 증가함에 따라 더 많은 토오크가 필요하다.

첫 번째 조임과 풀림과정에서 발생하는 체결력과 나사마찰계수와의 관계는 Fig. 3과 같다. 이때의 회전 속도는 3.67rpm이다. 일반적으로 T-P의 관계가 조임과정에서는 선형이나 풀림과정에서는 비선형이며 식(3)에서 얻어진 마찰계수는 체결력에 의존한다는 것을 의미한다. 조임과정에서 체결력이 10kN까지는 마찰계수가 감소하다가, 10kN 이상이 되면 일정하게 되어 체결력이 증가함에도 불구하고 마찰계수가 변하지 않는다. 이것은 조임과정에서 T-P관계가 어느 값 이상에서는 직선적이며 일정한 값에 도달한다는 것을 의미한다. 풀림과정에서의 나사마찰계수는 체결력이 증가함에 따라 서서히 감소한다.

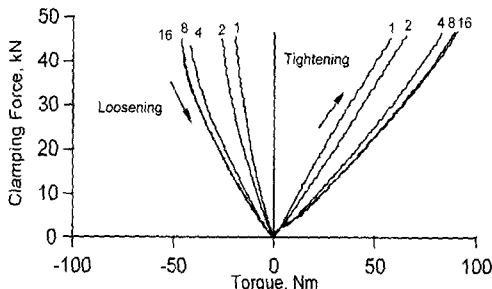


Fig. 2. Clamping force versus torque relationship for repeated tightening-loosening from a typical thread friction test

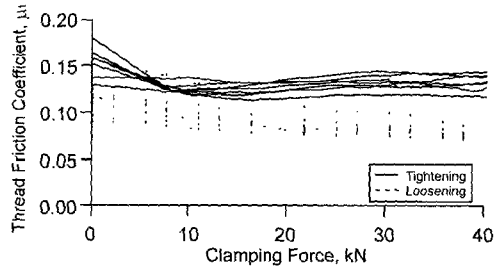


Fig. 3. Variation of thread friction coefficient on clamping force for tightening

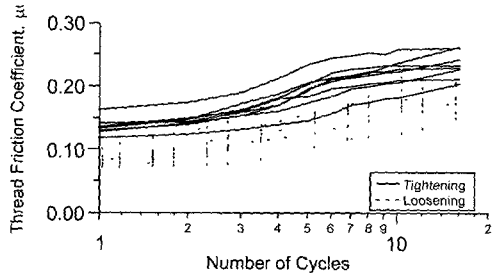


Fig. 4. Change in friction with repeated tightening-loosening

Fig. 4는 유기물을 코팅한 M12×1.75 플랜지 육각볼트 너트로 회전속도는 3.67rpm일 때 조임과 풀림의 반복에 따른 나사마찰 계수의 변화를 나타내는데, Fig. 3에서 비교적 나사 마찰계수가 일정하였던 영역인 체결력이 25kN일 때의 결과들이다. 확실히 조임-풀림과정이 반복됨에 따라 나사마찰계수가 증가한다. 이것은 조임과 풀림이 반복됨에 따라서 나사표면의 코팅부분의 박리됨으로 표면저항기가 증가함에 따른 것으로 사료된다. 그리고 조임과정의 경우가 풀림과정 보다 나사마찰계수가 항상 크다.

Fig. 3과 4에서 결과적으로 나사마찰계수는 체결력 뿐만 아니라 조임과 풀림의 반복작용에 의해서도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 다음은 나사의 조임-풀림 속도 변화에 따른 영향을 알기 위해 회전속도를 3.67rpm, 18.3rpm, 36.7rpm, 73.3rpm 등으로 변화하여 보았다. 이 실험에서는 M12×1.75 육각플랜지 볼트와 너트에 유기질을 코팅하였다. Fig. 5는 나사를 처음 조일 때 회전속도 변화에 따른 나사마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 마찬가지로 체결력은 25kN으로 하였으며, 실험한 범위 내에서는 나사마찰계수의 값이 0.13에서 0.15사이로 저속이거나 고속인 경우에 약간의 변화는 있으나 큰 차이는 없었으며, 회전속도가 18rpm 이상에서는 나사마찰계수가 통계적으로 일정하게 되는 경향이 있다.

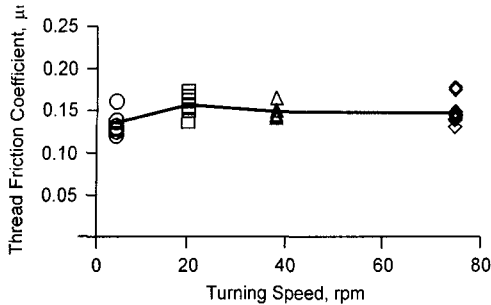


Fig. 5. Influence of turning speed on thread friction

Table 1. Experiment for the influence of using prevailing torque nut

Specimen	Bolt	Nut
Combination	M12×1.75×70 Hex Flanged Bolt with Organic Coat	M12 Hex Flanged Nut with Organic Coat, Prevailing Torque due to Distorted Thread

프리베일링(Prevailing) 토오크너트(Torque nut)는 너트의 자동 풀림을 막으려고 설계된 너트이다. 프리베일링 토오크 너트는 접촉하는 부분에 나사를 적당하게 짜뿌려서 추가적으로 풀림을 억제하는 프리베일링 토오크너트를 실험적으로 평가하였다. 볼트와 너트의 사양과 실험은 Table 1과 같다.

Fig. 6은 실험시편에 의한 첫 번째 조임-풀림으로 얻어진 T-P 관계로서, 이 실험에는 일반적인 유기질 코팅한 M12×1.75 육각플랜지 볼트와 나사를 짜뿌린 프리베일링 토오크 너트를 이용하였다. 유기질 코팅한 육각플랜지 볼트와 너트를 비교하여 볼 때 나사를 조이는 토오크가 10~20Nm사이에서 체결력이 거의 0에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이것은 짜뿌린 프리베일링 토오크 너트가 짜부러진 부분에 이미 존재하는 변형을 완화시킨다고 외부에서 주어진 토오크가 어느 정도 소모되기 때문이라고 사료된다.

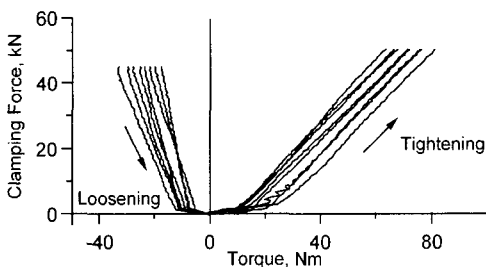


Fig. 6. T-P relationship for first tightening-loosening(Flanged Bolt with Organic Coat)

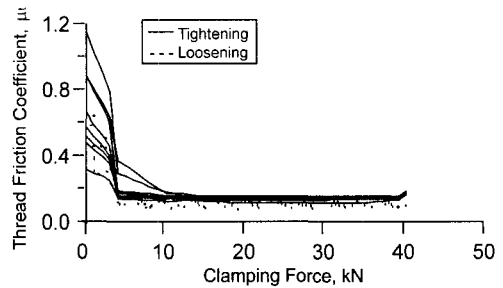


Fig. 7. Dependence of thread friction on clamping force when using prevailing torque nuts

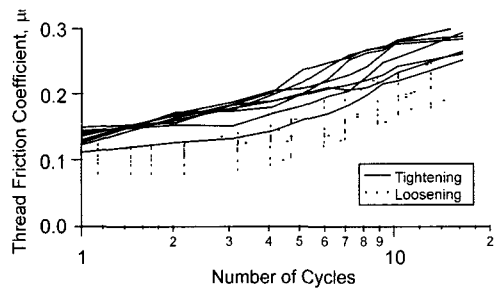


Fig. 8. Thread friction variation with repeated tightening-loosening

Fig. 7은 유기질 코팅한 M12×1.75 육각플랜지 볼트와 너트로서 이때 회전 속도는 18.3 rpm이며 나사체결력을 인자로 한 나사마찰계수를 나타낸다. 짜뿌려트린 프리베일링 토오크 너트를 이용하면 나사마찰이 처음 조이는 과정에서 체결력이 0에서 가장 크고 바로 감소된다. 이렇게 감소하다가 어느 변곡점을 지나면 체결력이 증가하여도 변하지 않게 된다. 실제로 체결력 4kN이상에서는 모든 실험에서 나사마찰계수는 안정적이며 일정하다. 보통의 너트에 비하여 짜부러진 프리베일링 토오크 너트를 이용하면 짜부러진 부분의 영향으로 처음 과정에서 마찰계수가 더 크다.

Fig. 8은 체결력 25 kN 상태에서 조임-풀림을 반복함에 따른 짜부러진 프리베일링 토오크 너트의 나사마찰계수의 변화를 나타낸 것으로서 유기질 코팅한 M12×1.75 육각플랜지 볼트와 너트를 회전 속도 18.3 rpm에서 측정된 결과이다. 이 경우는 일반적인 너트와 마찬가지로 조임-풀림 과정을 반복함에 따라 서서히 나사마찰계수가 증가하고 있으며 특히, 조이는 과정이 풀림 과정보다 마찰계수가 더 크다. 체결력이 0에 가까울 경우 프리베일링 토오크 너트를 이용하기 위해서는 너트를 움직이기 위한 어느 정도의 토오크가 필요하다. 프리베일링 토오크

너트를 이용한 모든 실험에서 마찰에서 프리베일링 토오크 영향이 잘 나타났음을 알 수 있는데 프리베일링 토오크가 4Nm이하이다. 실험 결과 프리베일링 토오크는 조임-풀림이 반복함에 따라 감소한다.

5. 결론

나사 마찰 특성을 확인하는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 볼트 결합부의 마찰 특성에 있어서 재료와 그 표면 조건이 큰 영향을 끼친다는 것을 확인하였다.
- 2) 볼트 결합부의 마찰계수는 재료와 표면상태에 따른 조임-풀림 반복수에 따라 크게 변할 수 있다.
- 3) 나사 마찰은 조이는 과정이 풀리는 과정보다 마찰이 큼을 알 수 있어 향후 볼트 결합부에 좋은 설계 데이터로 이용될 수 있다.

감사의 글 : 이 논문은 2001년도 교내 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1) T. Sakai, "The Friction Coefficient of Fasteners,"

Bulletin of the JSME, Vol. 21, No. 152, Feb., pp. 333-340, 1978.

- 2) W. Eccles, "Design Guidelines for Torque Controlled Tightening of Bolted Joints," SAE paper No. 930578, 1993.
- 3) M. Hagiwara and N. Ohashi, "A New Tightening Technique for Threaded Fasteners," Transaction of the ASME, Vol. 116, pp 64-69, 1994.
- 4) T. Fukuoka and T. Takaki, "Mechanical Behaviors of Bolted Joints during Tightening using Torque Control," JSME International Journal, Series A, Vol. 41, pp. 185-191, 1998.
- 5) A. Bray and R. Levi, "Factors Affecting Tightening Characteristics of Bolts" Experimental mechanics, Vol. 6, pp. 409-419, 1966.
- 6) Y. Jiang, J. Chang and C. H. Lee, "An Experimental Study of the Torque-Tension Relationship for Bolted Joints", International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 16, pp. 417-429, 2001.
- 7) Y. Jiang, M. Zhang and B. Huang, "Frictional properties Bolted Joints," Ford Report No 3, 2001.
- 8) A. Bhat, C. Lee and P. R. Perumalswami, "Some of the Factors Affecting the Reliability of a Bolted Joints," proc. 6th ISSAT Inter Conf. Orlando, FL, pp. 190-194, Aug. 9-11, 2001.