

볼트 결합부 풀림에 관한 마찰 특성

(제 II 보 : 너트-와셔 지지 마찰 실험)

박태원 · 신귀수*[†] · Yanyao Jiang**

전주공업대학 자동차과 · *전북대학교 자동차산학협력원

**Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno
(2003. 8. 20. 접수 / 2004. 2. 27. 채택)

The Friction Characteristics on the Loosening of Bolted Joints

(II, Nut - Washer Bearing Friction Experiments)

Tae-Won Park · Gwi-Su Shin*[†] · Yanyao Jiang**

Department of Automobile, Jeonju Technical College

*Chonbuk National University Automobile Research Institute

**Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno
(Received August 20, 2003 / Accepted February 27, 2004)

Abstract : By using an experimental approach recently developed to determine the torque-tension relationship for bearing frictional characteristics of several typical bolted joints were studied. The experimental approach allows the direct determination of the bearing friction between the nut and its bearing surface. Detailed friction studies were made on the influences of the size and shape of the hole, the use of a slot in a bolted joint, contact area and position, and other factors such as turning speed, coating, and the use of wax on the bearing surface. The contact area and position of the washer have a marginal effect on the bearing friction. The organic coating on the nuts reduces the bearing friction significantly. Nuts with organic coating over a washer with zinc finish provide the smallest and the most consistent bearing friction. The results from the experimental investigation will be helpful for the better design of bolted joints.

Key Words : frictional characteristics, bearing friction, contact area and position, washer

1. 서 론

기계 구조물, 화학 플랜트 등에서 큰 힘과 반복적인 운동을 갖는 부분을 체결하는 요소로서 또한 동력을 전달하는 운동용 요소인 볼트 결합부는 공업 분야에서 널리 사용되고 있는 기계요소이다. 볼트-너트 체결체인 볼트 결합부는 결합초기에는 볼트에 충분한 인장력이 주어져 완전한 체결이 되어도 운동 전달 도중에 수반되는 충격, 진동, 열변동 등에 의하여 볼트 결합부의 인장력이 감소하든지 또는 너트 풀림으로 인하여 부품이 이완되어 자동차, 비행기, 교량 등의 파괴를 가져와 큰 인명피해를 유발

하는 원인이 되고 있다. 이런 볼트-너트 체결체의 풀림은 오래전부터 문제가 되고 있으면서 현실적 문제이다. 따라서 이러한 볼트 결합부의 풀림을 방지하기 위하여 풀림의 메카니즘을 규명할 필요가 있다.

일반적으로 볼트 결합부의 자동풀림에 대한 기구학적인 설명은 명확하지는 않지만 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⁾, Eccles³⁾, Hagiwara⁴⁾, Fukuoka⁵⁾, Bray⁶⁾ 등에 의해 많이 진행되고 있으며 이들의 연구는 지속되고 있다. 또한, 나사 풀림의 원인과 풀림에 의한 장애 등을 고려한 나사마찰 실험에 의하면 큰 체결력이 접촉표

[†]To whom correspondence should be addressed.
haazi@korea.com

면에 흠집을 만드는 것을 알 수 있다⁷⁾. 볼트 결합부 접촉표면에 소성변형이 발생되면 거친 표면의 마찰은 일반적으로 증가한다. 볼트 너트의 지지마찰에 있어서 플랜지가 있고 코팅이 있는 너트가 플랜지가 없고 코팅이 안된 너트에 비하여 덜 예민하다.

따라서 본 연구에서는 ref.(8)에서 제안한 나사 풀림의 원인에 근거하여 너트와 접촉하는 표면 사이의 지지마찰을 독립적인 실험 장치로 측정하여 볼트 결합부에서 너트-와셔의 표면조건, 회전속도, 접촉영역 및 접촉위치 등을 고려한 풀림에 대한 실험을 수행하여 지지마찰특성을 연구하고자 하였다.

2. 이론적 배경

볼트 결합부 나사의 풀림은 진동, 충격과 열 등에 의해 발생하는데 이중에 진동에 의한 풀림이 가장 많다. 이러한 진동에 의한 풀림 현상은 볼트축과 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 Junker는 다음 식으로 나타내었다.

$$\frac{dT}{dP} = \pm \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_i r_i}{\cos \beta} + \mu_n r_n \quad (1)$$

여기서, T 는 볼트 결합부에 작용하는 토크, P 는 체결부에 생기는 체결력, p 는 나사 피치, μ_i 는 너트와 볼트 나사산 사이의 마찰계수, μ_n 는 너트와 결합부 표면이나 와셔와의 마찰계수, r_i 는 나사의 유효반경, r_n 는 너트와 결합부 표면의 유효 반경이고 β 는 나사산 반각이다.

한편, 볼트 결합부가 운전중에 완전 분리되는 것을 방지하기 위하여 프리베일링(prevaling)볼트 너트를 사용하고 있다. 이것은 볼트와 너트의 나사산을 적당히 뒤틀거나 맞닿는 부분을 수정하여 너트와 볼트 사이에 나일론 등을 삽입하여 볼트 너트를 간섭한다. 사용되는 토크 볼트에서 너트를 멈추기 위하여 필요한 토크는 필요한 예 하중을 얻기 위한 토크에 추가되어야 한다.

토크 제어법을 이용하여 예하중을 조절하기 위한 일반적인 관계는 적용 토크와 체결력에 의해 다음

식과 같이 나타낼 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_i , μ_n 를 알면 결정할 수 있다. 비선형적인 T - P 관계를 고려한다면, T - P 관계에 대한 식은 식 (1)과 비슷한 식이 된다. 이 경우에 K 는 체결력 함수이다.

이 이론을 토대로 하여 실험적으로 나사마찰과 지지마찰을 극복하는데 필요한 토크 결정을 직접 수행하였다. Bray와 Levi⁶⁾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.

3. 실험

지지마찰 실험은 너트 표면과 와셔의 지지표면이나 체결부위의 표면과의 사이에 발생하는 지지마찰 계수를 구하는 실험이다. 너트는 회전하면서 판 표면에 압력을 가하게 된다. 본 실험은 볼트 결합부가 조임과 풀림을 반복할 때 너트 표면과 와셔 표면에서 일어나는 작용들을 실험하였다. 만능시험기의 특성상 축하중은 시간에 따라 선형적으로 증가, 감소시킬 수 있으며 동시에 비틀림 각을 비례적으로 변화시킬 수 있도록 하였다. 토크 T 와 축하중 P 가 동시에 측정되며 컴퓨터에서 자동 기록된다. Fig. 1은 본 연구에서 제작한 실험장치의 개략도 이다.

순수한 지지마찰만의 식은 식 (1)에서 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{dT}{dP} = \mu_n r_n \quad (3)$$

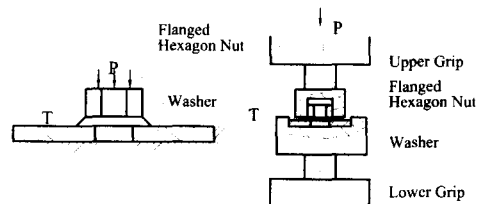


Fig. 1. Nut-Washer Friction Experimental Setup

여기서, r_n 은 주어지는 너트에서 구할 수 있고, 지지마찰 계수 μ_n 은 실험으로 얻을 수 있다. 위 식의 기울기는 실험으로부터 T-P 관계식의 수치적 차에 의해 얻어지며, 따라서 본 실험에 사용되는 만능시험기는 주기적인 비틀림 하중과 축 하중을 동시에 가할 수 있기 때문에 모든 실험에서 비틀림축과 축 하중을 제어변수로 하였다.

비틀림 각은 110° 이며 축 하중은 0.5kN에서 45kN 까지로 하였으며, 각 실험에서 조임과 풀림의 반복 주기는 17 사이클로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 너트-와셔 지지마찰 실험

일반적으로 너트와 와셔 사이의 지지마찰 토크는 전체 반발력의 40~50% 정도의 다른 반발 토크를 일으킨다. 이러한 지지마찰 실험은 조임-풀림 과정에서 너트와 와셔 표면사이의 지지표면 마찰을 극복하는데 필요한 토크 측정을 위해 설계된다. 각각의 실험에서 T-P관계를 측정하였으며, 식 (3)에 의해서 지지마찰계수는 체결력을 인자로 하여 구할 수 있다.

유기질 코팅 플랜지 육각볼트의 토크 T와 체결력 P의 관계는 Fig. 2와 같다. 그림과 식 (3)을 이용하여 나사마찰 계수 μ 를 구할 수 있는데, 그림에서 보여주는 것과 같은 체결력을 얻는다. 필요한 토크의 크기는 나사를 조일 경우가 나사를 푸는 경우보다 역시 크게 나타났으며, 반복수가 증가함에 따라 더 많은 토크가 필요하다.

Fig. 3은 유기물을 코팅한 M12×1.75 플랜지너트와 1018강 와셔를 이용하여 회전속도 9.16rpm에서 체결력과 지지마찰계수와의 관계를 나타낸다. 지지마찰에 대한 여러 가지 요인들이 있으나 본 실험에서는 회전속도, 접촉면적과 위치, 코팅 그리고 표면

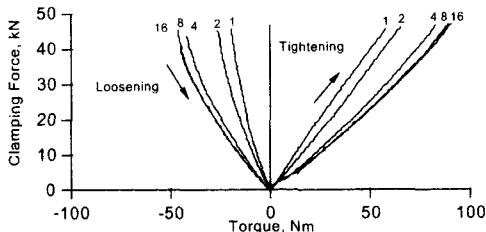


Fig. 2. Clamping force versus torque relationship for repeated tightening-loosening from a typical thread friction test

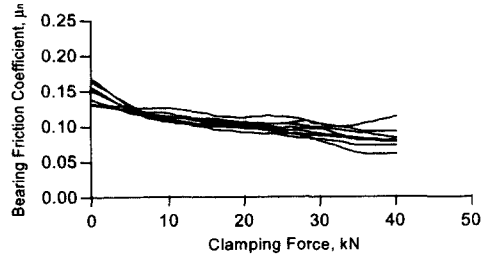


Fig. 3. T-P relationship for first tightening

상태 등을 실험하였다. 그림에서 보는바와 같이 지지마찰계수는 체결력이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2. 회전속도의 영향

너트와 와셔 사이의 지지마찰에 관한 회전속도의 영향을 조사하기 위하여 1018강 와셔를 사용하였다. 와셔의 구멍 크기는 12.7mm이며 너트는 M12×1.75로 유기물을 코팅하였다. 회전속도는 3.67rpm, 9.16rpm, 18.3rpm, 36.7rpm 그리고 54.9rpm에 대하여 측정하였다.

회전속도 영향에 대한 지지마찰 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 때의 체결력은 25kN이다. Ref.(8)에서 나타낸 나사마찰에 대한 회전속도의 영향과 마찬가지로 지지마찰에 대한 회전속도의 영향도 한계성이 있으며 약 0.13에서 0.15 정도이다. 낮은 속도가 높은 속도 보다 지지마찰계수가 적다. 그러나 회전속도가 18rpm정도 이상이 되면 회전속도에 대한 지지마찰계수의 변화가 뚜렷하지 않음을 알 수 있다.

4.3. 접촉면적과 접촉위치의 영향

본 실험에서는 구멍의 크기와 슬롯(slot)의 크기가 다른 와셔를 실험하였다. 회전속도는 9.16rpm이고 구멍의 크기는 12.7mm, 14mm, 16mm 그리고 18mm이며 와셔의 재질은 1018강, 너트는 M12×1.75에 유기물을 코팅한 것을 실험하였다.

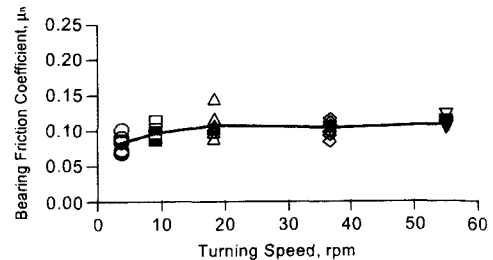


Fig. 4. Influence of turning speed on bearing friction

Fig. 5는 유기물 코팅된 너트에 서로 다른 와셔에 실험으로 처음 조일 때의 체결력이 25kN인 경우에 와셔 구멍의 크기에 따른 지지마찰계수 변화를 나타낸 것이다. M12 너트인 경우에 있어서 구멍의 크기에 따른 지지마찰계수의 변화가 구멍 크기 15mm 이하인 경우에 거의 없다. 전체 4개 다른 구멍 크기의 변화에 대하여 지지마찰계수는 Fig. 3과 같이 체결력의 증가에 따라서 모두 감소하는 경향이 있었다. 조임-풀림 반복수는 본 실험에서 지지마찰계수에 어떤 한계 값으로 설정하여 17 사이클 이상 반복하였다.

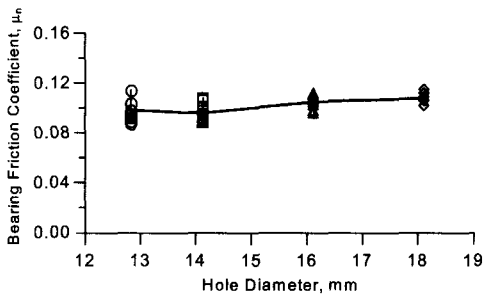


Fig. 5. Influence of hole size on bearing friction

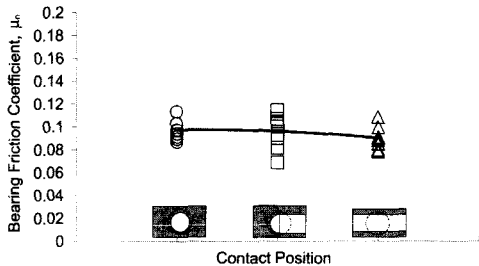


Fig. 6. Influence of contact position of bearing friction

Fig. 6은 슬롯을 가진 와셔와 너트사이의 위치에 따른 지지마찰 실험을 통한 결과이다. 이때 와셔는 1018강이며 회전속도는 9.16rpm, 체결력은 25kN이다. 슬롯의 폭과 구멍 직경은 12.7mm이다. 너트는 M12×1.75 육각너트이며 유기물을 코팅하여 사용하였다. 지지마찰계수에 대한 접촉위치의 영향은 아주 적은 것으로 나타났다. 한 쪽 끝에 슬롯을 한 것이 데이터의 분산이 약간 증가함을 알 수 있다. 이것은 이 접촉면적이 균일한 대칭적 형상이 아님에 의해 생기는 원인으로 생각된다.

동일 조건에 의한 실험으로 슬롯의 크기를 변화하여 실시하였다. 실험에 의하면 슬롯의 크기가 증가할수록 지지마찰계수의 증가가 미미함을 발견하

였다. 이러한 결과를 종합하여 보면 1018강에서 슬롯의 크기, 위치에 따른 지지마찰계수에 대한 영향이 별로 없음을 의미한다. 평균 지지마찰계수는 약 0.1이었다.

육각 플랜지 너트와 와셔 또는 슬롯의 접촉을 요인으로 한 구멍과 슬롯의 크기에 따른 지지마찰계수의 반응이 일정치가 않음을 알 수 있는데, 시험편을 관찰하여 보면 접촉압력이 플랜지 너트의 바깥쪽 링부분에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 접촉면적의 작은 변화는 전체 지지마찰에 큰 변화를 주지 않는다는 결론을 얻었다.

4.4. 코팅과 표면상태의 영향

너트와 와셔 사이의 마찰에 영향을 주는 요인은 너트와 와셔의 코팅과 표면상태이다. 표면상태와 코팅에 의한 영향을 연구하기 위하여 10개의 너트와 9개 와셔를 사용하여 전체 68가지 다른 조건들로 실험하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 샘플의 보기이다. 사용된 왁스는 Terotex 895215로서 이 왁스는 260°F에서 묽음단위로 와셔들을 코팅하였다. 이 실험은 회전속도 18.3rpm에서 실시하였으며 각 실험에서는 5~10개 시험편들을 사용하였다. 이때 마찰계수는 식 (3)을 사용하여 결정하게 된다.

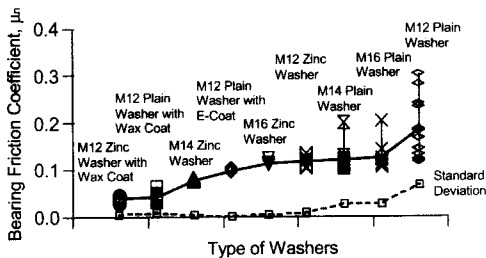
Fig. 7(a)는 M12 육각플랜지 아연너트에 유기질을 코팅하여 9가지 다른 와셔와의 지지마찰을 실험한 결과이고, Fig. 7(b)는 같은 육각 플랜지 아연너트에 크롬산염을 코팅한 것에 9가지 다른 표면을 가진 와셔에 대한 실험 결과이다. 여기서 실선은 지지마찰계수의 평균차이고 점선은 표준편차이다. Fig. 7(a), (b)에서 보는바와 같이 너트의 코팅과 표면 상

Table 1. Experiments for Nut-Bearing Friction

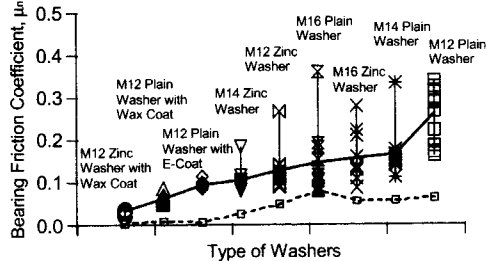
| Type of Washers | Type of Nuts | |
|--------------------------|--|---|
| | M12 Hex Flanged Nut with Zinc Organic Coat | M12 Hex Flanged Nut with Zinc Chromate Coat |
| M12 Zinc Plated | 301Z12 | 309Z12 |
| M12 Plain | 301P12 | 309P12 |
| M12 Zinc Plated With Wax | 301Z22 | 309Z22 |
| M12 Plain With Wax | 301P22 | 309Z022 |
| M12 Plain With E-Coat | 301P32 | 309P32 |
| M14 Zinc Plated | 301Z14 | 309Z14 |
| M14 Plain | 301P14 | 309P14 |
| M16 Zinc | 301Z16 | 309Z16 |
| M16 Plain | 301P16 | 309P16 |

태가 지지마찰계수에 뚜렷한 영향을 주는 것을 알 수 있다. 즉 코팅을 함으로써 마찰계수를 감소시키는 결과를 가져오는 것을 알 수 있다. 또한 아연-크롬산을 코팅한 M12 육각플랜지 너트가 아연 유기질 코팅너트의 경우보다 마찰계수가 큰 것을 알 수 있으며 아연-크롬산염을 처리한 너트가 아연 유기질을 코팅한 너트보다 데이터의 산포가 크다. 또 그림에서 E-코팅한 평와서는 두가지 너트 형태에서도 마찰계수가 평균 0.1이며 표준편차는 똑 같이 작았다.

Fig. 8은 체결력 25kN, 회전속도 18.3rpm에서 조임-풀림 반복수에 따른 지지마찰계수의 변화를 보여주고 있는데, 이 실험결과는 아연 크롬산 코팅을 한 M12 육각플랜지 너트에 9가지 서로 다른 표면상태 와셔들에 대한 실험 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 반복된 조임-풀림 과정에서 거의 일정한 지지마찰계수들을 보여주지만, 세가지 형태인 M12, M14, M16 평와셔에 대해서는 반복수가 10에서 급격한 증가 거동 반응을 보였다. 이 결과로부터 평 와셔가 아연 와셔보다 높은 마찰 저항을 가지고 있으며, 아연 와셔의 지지마찰계수는 반복수에 대하여 별로 변화가 없음을 알 수 있었다. 또한 아연 와셔의 마찰계수는 조임과 풀림을 반복함에 따라 안정되었으나 평와셔의 경우는 지지마찰계수가 불안정하였다.



(a) Against M12 hexagon flange nuts with zinc organic coating



(b) Against M12 hexagon flange nuts with zinc chromate coating

Fig. 7. Summary of influence of washer surface condition on bearing friction

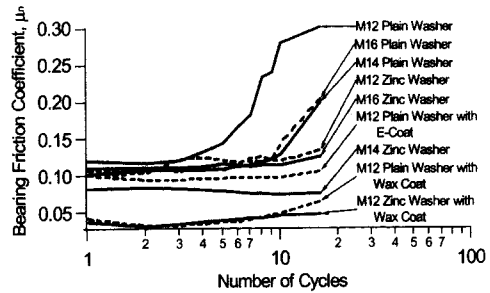


Fig. 8. Influence of repeated tightening/softening on bearing friction

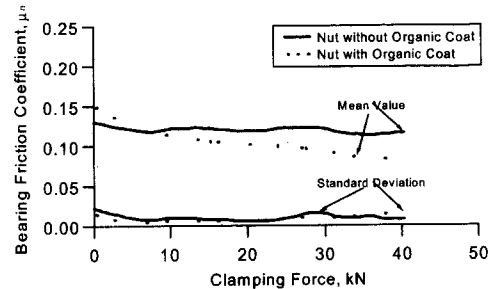


Fig. 9. Statistic results of nut-bearing friction coefficient with the influence of clamping force (first tightening)

마지막으로 너트의 유기질 코팅 및 코팅을 제거한 경우의 실험을 하였다. 유기질 코팅을 120번 사포로 문질러 제거하였으며, 실험은 1018강 와셔로서 회전속도는 18.3rpm으로 하였다. Fig. 9에 체결력에 따른 지지마찰계수의 변화를 나타내고 있으며 역시 와셔의 재질은 1018강이고 회전 속도는 9.16 rpm이다. 코팅을 제거하고 연마한 너트의 지지마찰계수가 코팅한 너트보다 큼을 알 수 있다. 역시 코팅을 제거한 너트와 지지마찰계수는 체결력이 증가함에 따라 감소하고 있으나, 코팅이 된 너트는 변화가 거의 없었다.

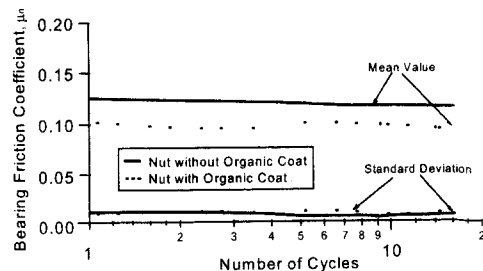


Fig. 10. Statistic results of nut-bearing friction coefficient with the influence of repeated tightening-loosening (tightening process)

조임-풀림 반복수에 따른 지지마찰계수의 변화에 대하여 체결력이 25kN일 때 반복된 조임-풀림에 따른 변화를 그림 Fig. 10에 나타내었다. 코팅한 것과 안한 것에 지지마찰계수를 비교하여 보면 반복된 과정에서 변화가 거의 없었다.

5. 결 론

볼트 결합부의 풀림 특성 파악을 위한 너트-와셔 지지마찰 실험을 통해 재료와 그 표면 조건이 볼트 결합부의 마찰에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며, 반복된 조임-풀림 과정에서 특히 접촉표면이 코팅이 된 경우가 마찰이 증가함을 알 수 있었다. 또한 구멍크기, 회전속도, 그리고 접촉위치가 볼트 결합부의 마찰에 큰 영향을 주지 않을 수 있었다. 볼트 너트의 자동 풀림을 막기 위한 프리베일링 토크 너트의 사용으로 너트를 반복해서 사용하는 경우 원하는 만큼 효과를 갖지 못했다. 따라서 너트에 유기질 코팅을 함으로써 보다 정밀한 접촉 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) G. H. Junker, "New Criteria for Self-loosening of Fasteners Under Vibration", SAE Paper 690055, pp. 314~335, 1969.
- 2) T. Sakai, "The Friction Coefficient of Fasteners", Bulletin of the JSME, Vol. 21, No. 152, Feb., pp. 333~340, 1978.
- 3) W. Eccles, "Design Guidelines for Torque Controlled Tightening of Bolted Joints", SAE paper No. 930578, 1993.
- 4) M. Hagiwara and N. Ohashi, "A New Tightening Technique for Threaded Fasteners", Transaction of the ASME, Vol. 116, pp. 64~69, 1994.
- 5) 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.
- 6) A. Bray and R. Levi, "Factors Affecting Tightening Characteristics of Bolts", Experimental mechanics, Vol. 6, pp. 409~419, 1966.
- 7) 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.
- 8) 박태원, 신귀수, Y. Jiang and Ming Zhang, "볼트 결합부 풀림에 관한 마찰 특성", 산업안전학회지, Vol. 18. No. 2, pp. 1~5, 2003.