



## 건식윤활코팅이 볼트 마찰계수에 미치는 영향

정현수<sup>a\*</sup>, 한혜선<sup>a</sup>, 김준수<sup>a</sup>, 김기승<sup>a</sup>

## Effect of Dry Film Lubricant on Friction Coefficient in Bolts

Hyun Su Jung<sup>a\*</sup>, Hye Sun Han<sup>a</sup>, Jun Su Kim<sup>a</sup>, Ki Seung Kim<sup>a</sup><sup>a</sup> AISR Mechanical R&D Lab, LIGNex1 Co. Ltd.,  
207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin, Gyeonggi-do, 16911, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	17	July	2018
Revised	15	August	2018
Accepted	17	August	2018

## Keywords:

Bolt  
Dry film lubricant  
Friction coefficient  
Torque-tension relationship

## ABSTRACT

Dry film lubricants are used in Martian probes, artificial roller bearings, and power transmitters for infrared detectors. This study experimentally investigates the effect of a dry film lubricant on the thread, head friction coefficient, and torque-tension relationship in M5 and M6 bolts. Tests were conducted by combining the bolts with a hexagon flange nut and hexagon flange locking nut, and the test apparatus collected real-time data on the tightening torques, bolt axial forces, and corresponding reaction torques. The test data were then used to calculate the thread and head friction coefficients. The test results show the changes in friction coefficients of dry film lubricated bolts during tightening. This work will have significant influence on the reliability and safety of dry film lubricated bolt joint structures in many mechanical structural systems.

## 1. 서론

다양한 장비에서 사용되는 볼트 구조물은 체결 시 축력이 적절하지 못하면 장비의 성능 및 내구성이 떨어진다. 특히 위성과 같은 극심한 온도변화 환경에서 운용되는 장비에 적용된 볼트의 축력은 매우 중요한 요소이다<sup>[1]</sup>. 그러므로 장비가 운용되는 외부환경을 고려하여 초기 축력 최적값을 산출하고, 적절한 체결토크를 볼트에 적용하여 축력을 정확하게 발생시켜야 한다. 축력은 볼트의 항복강도의 50%에서 소성영역까지 산업분야 특성에 맞게 설정된다<sup>[2,4]</sup>. 하지만 축력은 일반적으로 장비 조립 중 측정하기 어렵고, 측정한다고 하여도 많은 비용이 발생한다. 체결토크와 축력의 관계에서 마찰은 중요한 요소이다. 만약 마찰이 없다면 축력은 발생하지 않을 것이다. 반면 마찰이 크다면 체결 과정에서 볼트에 큰 비틀림

하중이 발생하여 원하는 축력을 얻는데 한계가 있다. 이러한 이유로 작업자는 볼트의 마찰계수를 통제하고 체결토크 또는 체결 각도를 이용하여 목표한 축력을 정확하게 발생시킨다.

일반적으로 마찰계수를 통제하기 위해 도금, 액체윤활, 건식윤활 등을 적용한다<sup>[5,6]</sup>. 또한 대부분의 장비 제조회사는 볼트의 마찰계수가 변하는 것을 우려하여 사용을 1회로 제한한다. 하지만 볼트의 사용 가능성이 부족하거나 경제적인 이유로 재사용 하는 경우가 있다. Morgan은 자동차 휠에 적용된 볼트가 조임과 풀림을 반복하였을 경우, 동일한 체결토크에 발생하는 축력이 최대 50%까지 감소할 수 있음을 확인하였으며, 윤활유를 사용하여 축력 감소 문제를 해결할 수 있음을 발견하였다<sup>[7]</sup>. Park and Shin은 유기물 코팅된 볼트의 체결 횟수와 체결 속도에 따라 마찰계수와 축력의 변화를 분석하였다<sup>[8,9]</sup>.

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-288-9468  
fax: +82-31-288-9122

E-mail address: HyunSu.Jung@lignex1.com (Hyun Su Jung).

Croccol and Olmi는 볼트에 록타이트(loctite)를 적용하면 마찰계수가 감소한다는 사실을 발견하였으며, 흑색산화처리와 아연코팅이 적용된 볼트의 마찰계수에 대한 연구를 수행하였다<sup>[10,11]</sup>. Nassar은 Magni 565 코팅이 적용된 볼트를 이용하여 코팅의 두께와 마찰계수의 관계를 연구하였다<sup>[12]</sup>. Eccles는 전기아연도금된 볼트와 너트 조합의 체결 횟수에 따라 축력 및 마찰계수의 변화를 실험을 통해 확인하였다<sup>[13]</sup>. 그리고 Fukuoka는 체결 과정 중 마찰계수가 변화한다는 사실을 실험을 통해 확인하였다<sup>[14]</sup>.

본 논문에서는 화성탐사선, 인공위성 톨라베어링, 적외선 감지기의 동력전달장치 등에서 사용되고 있는 건식윤활코팅이 볼트에 적용되었을 때 볼트의 마찰계수와 토크-축력 관계에 미치는 영향을 연구하였다. 볼트와 너트가 체결되는 과정과 체결과 풀림이 반복되면서 볼트 나사면과 자리면에서 마찰계수의 변화를 실험을 통해 측정하였다. 본 연구는 건식윤활코팅에 따른 볼트의 토크-축력 관계 변화에 대한 이해를 도울 것이며, 많은 기계 구조 시스템에서 건식윤활코팅이 적용된 볼트결합 구조의 신뢰성 및 안전성에 대한 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

## 2. 건식윤활코팅

1950년대 이후 사용된 건식윤활코팅(dry film lubricant, DFL)은 성형가공성을 향상시키고 운송 및 취급 시 부식 방지, 굽힘 방지, 마모방지 기능을 제공하며, 특히 마찰계수를 낮추는 기능을 제공한다<sup>[15]</sup>. 건식윤활 기술은 항공 우주 산업의 요구로 인해 급속도로 발전이 진행되었으며, 현재는 항공, 우주 산업분야뿐만 아니라 자동차, 반도체 등 다양한 산업 환경에서 사용되고 있다. 본 논문에서는 디크로나이트사(dicronite)에서 개발한 DL-5공정을 통해 생성된 건식윤활코팅을 적용하였다.

DL-5공정<sup>[16]</sup>은 고압의 압축공기를 이용하여 건조한 금속성 윤활제인 텅스텐 이황화( $WS_2$ )재료를 분사하는 방식으로 결합제나 접착제 없이 즉시 침투하여 모재를 코팅한다. 공정은 상온에서 수행되기 때문에 공정간 모재의 물리적, 형상적 변형이 발생하지 않는다. 공정 순서는 세척 및 코팅 범위를 지정한 후 1차 코팅으로 접착력을 강화시킨다. 그리고 2차 코팅으로 텅스텐 이황화 재료를 도포하고 마감처리를 마지막으로 공정이 끝난다. 건식윤활코팅의 특징은 화학적 저항력이 크고 적용 온도 범위가 넓으며, 비용적인 측면에서 유리하다. 또한 재질에 상관없이 적용 가능하며, 특히 얇은 코팅 두께로 구조물 간의 조립 시 관리가 용이하다는 장점이 있다.

본 절에서는 시편에 DL-5 건식윤활코팅을 적용하여 코팅의 접착력 확인과 코팅 두께 측정을 수행하였다. 이 두 가지 시험은 본 논문에서 기술하고자 하는 마찰과 토크, 축력과 관련된 시험으로 사전에 코팅에 대한 검증을 위해 수행하였다.

### 2.1 접착력 시험 및 결과

ASTM-D2510<sup>[17]</sup>을 참고한 접착력 시험(film adhesion test)을 통해 코팅의 접착성을 확인하였다. 시험 과정은 다음과 같다. 시편 상에 폭 0.5 inch 간격으로 칼을 사용하여 평행하게 스크래치를 발생한 후 접착테이프를 부착한다. 접착테이프의 접착강도는 28 kg/m이다. 이후 수직을 유지하며 급격하게 떼어내며 피막 손상 흔적이 있는지 관찰하였다. Fig. 1은 접착력 시험 결과를 보여준다. 제거한 테이프에 남아 있는 피막은 없었으며 또한 시편 피막의 손상은 없는 것으로 확인하였다.

### 2.2 건식윤활코팅의 두께 측정 및 결과

DL-5 공정으로 생성된 두께는 매우 얇아 기계적인 측정 장비로는 측정이 어렵기 때문에 FIB (focused ion beam)와 SEM (scanning of electro microscope)을 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 측정이 가능하도록 FIB를 이용하여 특정 위치의 코팅을 제거한 형상과 각 부위에서의 측정 위치를 표시하였다. 측정 결과는 Table 1에 정리한 바와 같이 최소 0.412  $\mu m$  ~ 최대 0.641  $\mu m$ 이며 총 평균값은 0.517  $\mu m$ 로 산출되었다. 측정 결과로 보아 DL-5공정으로 생성된 코팅 두께는 0.5  $\mu m$  수준으로 보인다.

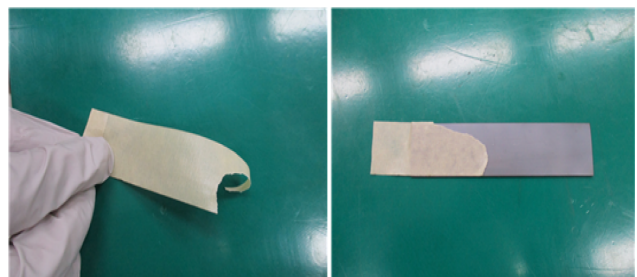


Fig. 1 Film adhesion test result

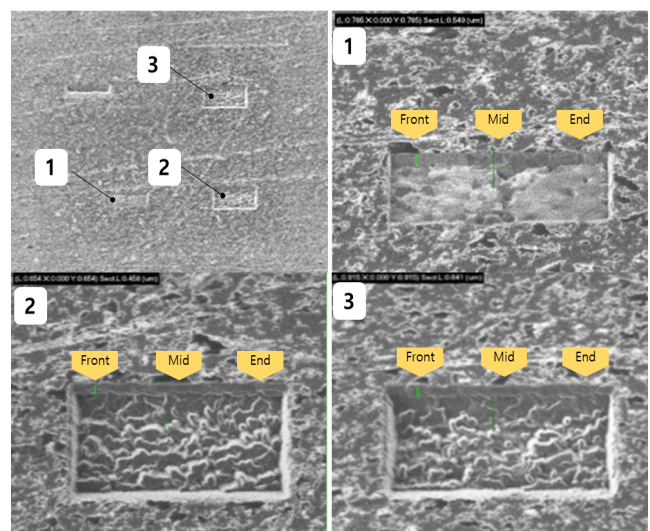


Fig. 2 SEM investigation to measure thickness

Table 1 Results of dry film lubricant thickness

Location	Front	Mid	End	Average
1	0.549 μm	0.526 μm	0.595 μm	0.557 μm
2	0.458 μm	0.412 μm	0.572 μm	0.481 μm
3	0.641 μm	0.549 μm	0.481 μm	0.515 μm
Total				0.517 μm

### 3. 볼트 체결 시험

일반적으로 볼트를 이용하여 체결할 때 볼트의 축력(clamping force,  $F$ )을 발생시키기 위한 체결토크(tightening torque,  $T$ )는 크게 다음 3가지로 나뉜다. 볼트를 인장시키기 위한 피치토크(pitch torque,  $T_p$ )와 나사산에서 발생하는 나사면토크(thread torque,  $T_{th}$ ), 볼트머리와 부재 간의 접촉되는 면에서 발생하는 자리면토크(head torque,  $T_h$ ) 이다. 이것을 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$T = T_p + T_{th} + T_h = F \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_{th} D_t}{2 \cos \beta} + \frac{\mu_h D_h}{2} \right) \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 나사 피치,  $\mu_{th}$ 는 볼트 나사면 사이의 마찰계수,  $\mu_h$ 는 볼트머리 자리면의 마찰계수,  $D_t$ 는 나사의 유효직경,  $D_h$ 는 볼트머리와 결합부 표면의 유효직경,  $\beta$ 는 나사산 반각이다.

#### 3.1 시험준비 및 방법

본 논문은 건식윤활코팅 적용 유무에 따른 볼트의 물리적 특성을 연구하고자 토크 측정 장치와 다양한 시편을 통해 시험을 수행하였다. Fig. 3은 볼트의 체결토크 및 축력, 나사면토크를 실시간으로 측정하는 장치로 볼트의 체결토크는 토크/각도 변환기(torque/angle transducer)를 통해 측정되고, 축력은 로드셀(load cell)을 통해 측정된다. 토크센서(torque sensor)를 통하여 측정된 토크(test measurement torque,  $T_{tm}$ )는 피치토크( $T_p$ )와 나사면토크(Thread torque,  $T_{th}$ )의 합으로 나타낼 수 있으며 식 (2)와 같다. Fig. 4는 시험장치 내부를 도식화 한 것으로 시험장치 특성상 힘과 토크만을 측정하기 때문에 마찰계수는 이론적 수식으로부터 구할 수 있다.

$$T_{tm} = T_p + T_{th} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 볼트 나사산과 볼트머리에 작용하는 마찰계수는 다음과 같이 유도된다.

$$\mu_{th} = \frac{\frac{T_{th}}{F} - \frac{p}{2\pi}}{\frac{D_t}{2 \cos \frac{\beta}{2}}} \quad (3)$$

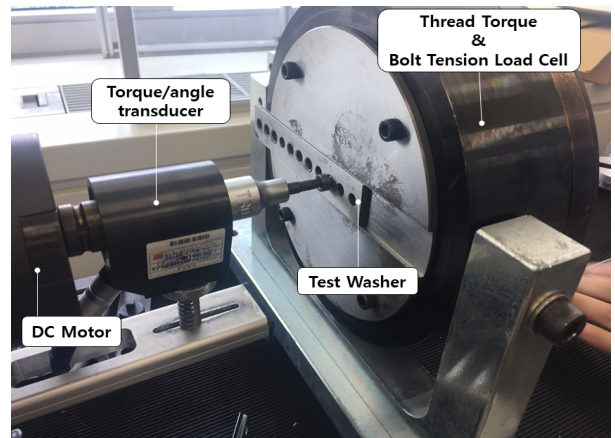


Fig. 3 Test apparatus

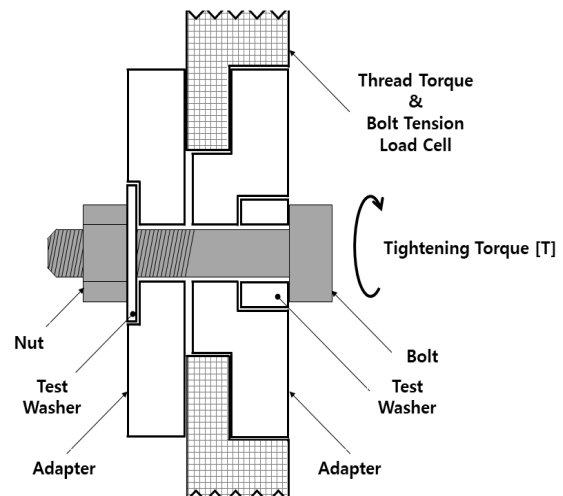


Fig. 4 Schematic diagram of test

Table 2 Bolt and nut dimensional details

	M5	M6
Thread pitch ( $p$ ) [mm]	0.8	1.0
Basic pitch diameter of thread ( $D_t$ ) [mm]	4.72	5.68
Included thread flank angle [deg]	60	60
Middle head diameter ( $D_h$ ) [mm]	8.5	10.0

$$\mu_h = \frac{2(T - T_{tm})}{D_h F} \quad (4)$$

시편은 크게 건식윤활코팅 적용 유무와 볼트 크기에 따라 분류하였다. 시편으로 사용한 볼트는 M5, M6 소켓 머리 볼트이며 자세한 치수는 Table 2와 같다. 추가로 항공이나 위성 분야에서 외부 진동으로 인한 풀림 방지를 위해 사용하는 잠김너트(lock nut)를 사용하는 사례가 있다. 이에 대한 볼트와 너트 조합의 특성을 확인하고자 육각플랜지 너트(hexagon flange nut)와 육각플랜지 잠김너트로 분류하였다.

Table 3 Test specimen

Specimen number	Size	Tightening torque [Nm]	Dry film lubricant	Nut type
#1	M5	5.1	O	Non lock
#2				Lock
#3				Non lock
#4				Lock
#5			X	Non lock
#6				Lock
#7	M6	7.1	O	Non lock
#8				Lock
#9				Non lock
#10				Lock
#11			X	Non lock
#12				Lock

시험 방법은 ISO 16047<sup>[18]</sup>을 준수하여 수행하였다. 일정한 토크를 적용하고자 체결 속도는 4 RPM를 적용하였고, 각각의 시편의 조합으로 조임과 풀림을 5회 반복하여 수행하였다. Table 3 시험 시편을 정리 한 것이다.

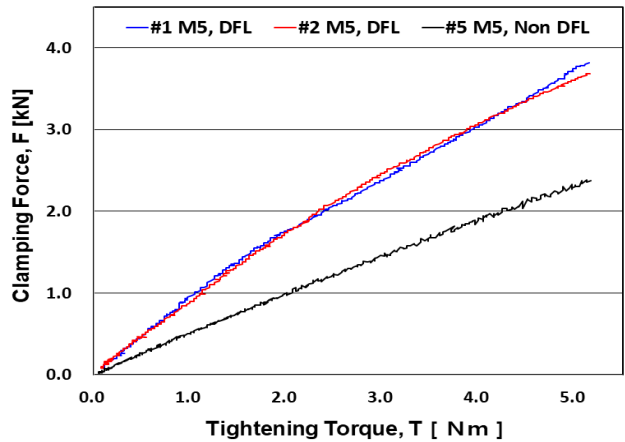
### 3.2 시험결과

Fig. 5, 6는 건식윤활코팅이 적용된 M5, M6 볼트와 육각플랜지 너트 조합에서의 시험 결과를 정리한 그래프이다.

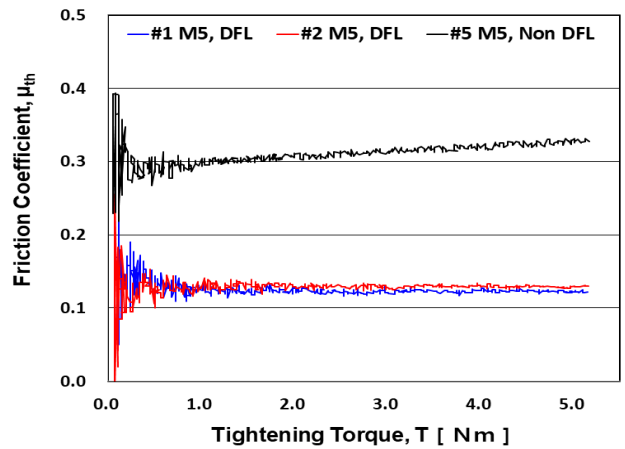
Fig. 5, 6(a)는 체결토크와 축력의 관계를 보여주는 그래프로 동일한 토크에서 코팅이 적용된 볼트가 코팅이 적용되지 않은 볼트보다 M5는 약 150%, M6은 140% 이상 높은 축력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5, 6(b), (c)로부터 건식윤활 코팅을 하면 마찰계수가 낮아지기 때문으로 판단할 수 있다.

또한 체결토크와 축력의 관계는 식 (1)에서 확인할 수 있듯이 마찰계수가 일정한 경우 선형관계이다. 그러나 체결토크가 증가할수록 기울기가 변하는 것을 볼 수 있는데 이는 체결 과정 중 마찰계수가 변하기 때문인데, 체결 과정 중 마찰계수가 변하는 것은 이전에 연구된 사실과 같다<sup>[8,9,12,14]</sup>.

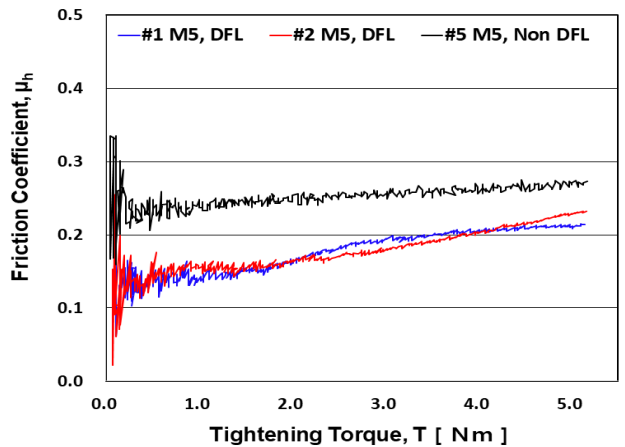
Fig. 5, 6(b)는 체결 과정 중 마찰계수의 변화를 보여준다. 코팅이 적용되지 않은 M5 볼트의 나사면 마찰계수는 약 0.287에서 0.327로 약 13.9% 상승하였으며 M6 볼트의 나사면 마찰계수는 0.267에서 0.306로 약 14.6% 상승하였다. M5, M6 볼트 모두 코팅이 적용되지 않았을 경우, 나사면 마찰계수가 상승하는 경향을 보인다. 반면 코팅이 적용된 M5, M6 볼트의 나사면 마찰계수는 체결 과정 중 상대적으로 거의 변화가 없다. 즉, 코팅이 적용되지 않은 볼트의 나사면은 체결 과정 중 마찰에 의한 손상이 발생하지만, 코팅이 적용된 볼트의 나사면은 마찰에 의한 손상이 거의 발생



(a) Torque-tension relationship



(b) Thread friction

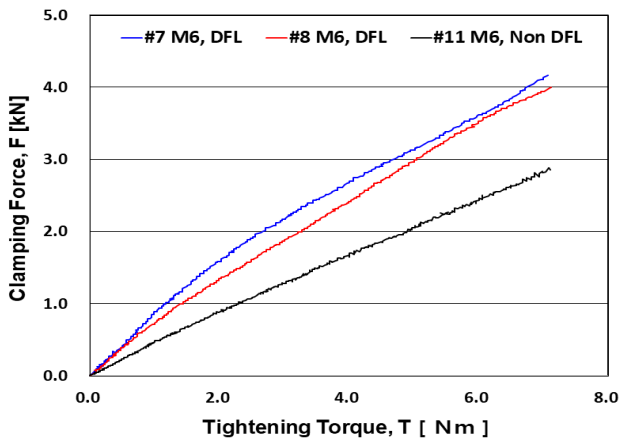


(c) Head friction

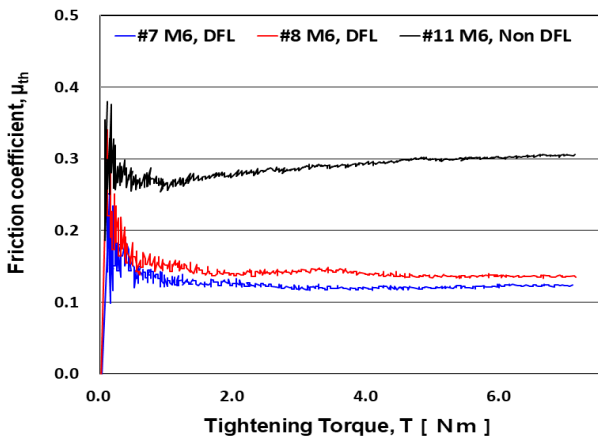
Fig. 5 Real-time data of DFL versus non DFL M5 bolt with hexagon flange nut

하지 않는 것으로 볼 수 있다.

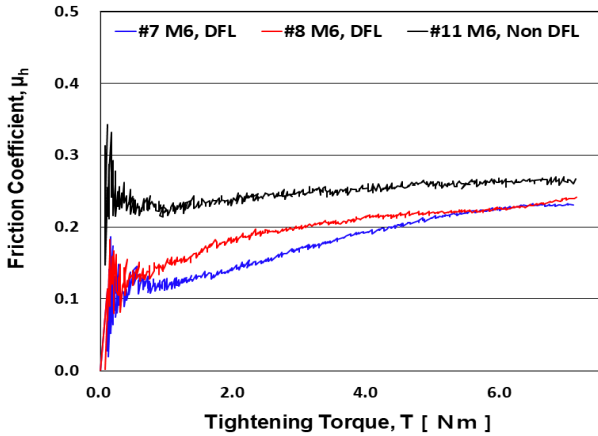
Fig. 5, 6(c)는 체결 과정 중 자리면 마찰계수의 변화를 보여준다. 코팅이 적용된 볼트의 자리면 마찰계수는 나사면과 동일하게 체결 과정 중 서서히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 반면 코팅이



(a) Torque-tension relationship

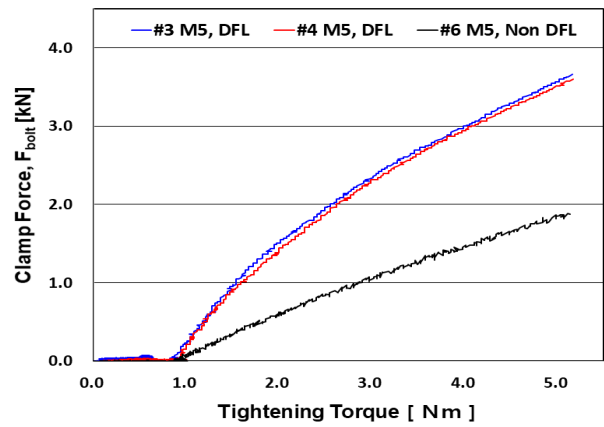


(b) Thread friction

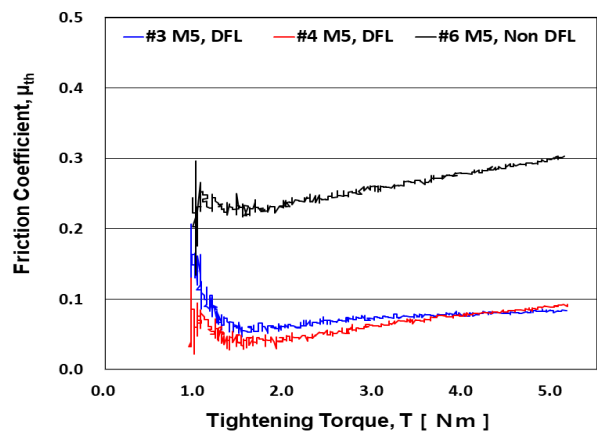


(c) Head friction

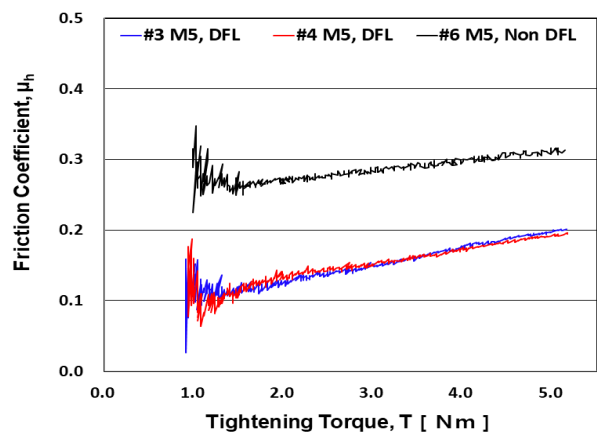
Fig. 6 Real-time data of DFL versus non DFL M6 bolt with hexagon flange nut



(a) Torque-tension relationship



(b) Thread friction



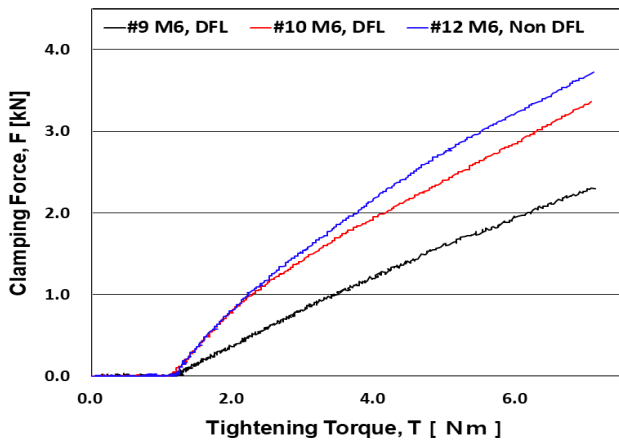
(c) Head friction

Fig. 7 Real-time data of DFL versus non DFL M5 bolt with hexagon flange lock nut

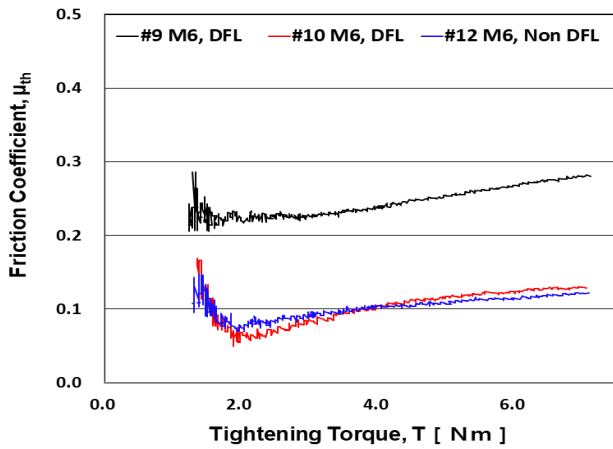
적용된 볼트는 나사면 마찰계수와 달리 자리면 마찰계수는 상승하는 경향을 보였다. 이것은 자리면의 코팅이 체결 과정 중 손상이 진행되고 있음을 간접적으로 보여준다.

Fig. 7, 8은 M5, M6 볼트와 육각플랜지 잠김너트 조합의 시험

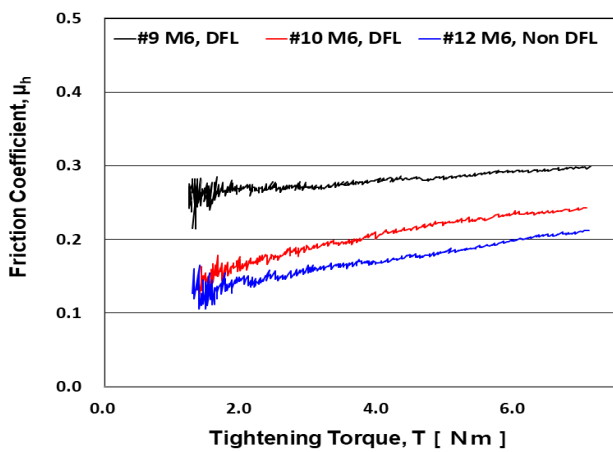
결과이다. 잠김너트는 앞서 언급하였듯 외부 진동으로 인한 풀림을 방지하기 위해 체결 시 볼트와 닿는 나사면에 기하학적 형상을 이용하여 강제로 소성변형을 발생, 풀림을 억제하는 너트이다. Fig. 7, 8(a)는 잠김너트가 적용된 볼트의 토크-축력 관계를 보여준다.



(a) Torque-tension relationship



(b) Thread friction



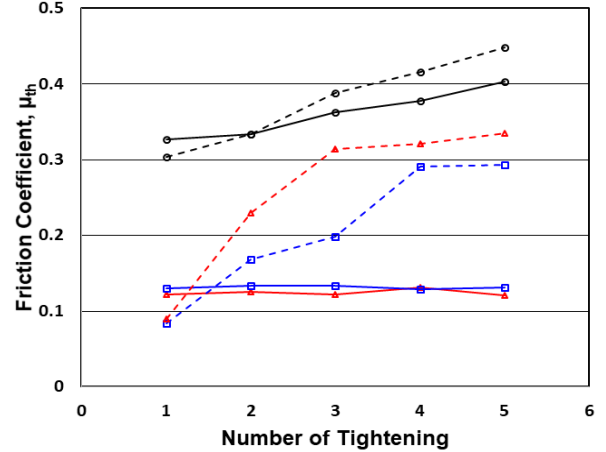
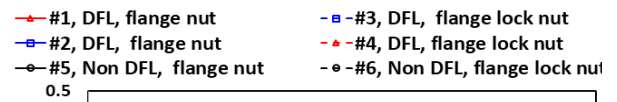
(c) Head friction

Fig. 8 Real-time data of DFL versus non DFL M6 bolt with hexagon flange lock nut

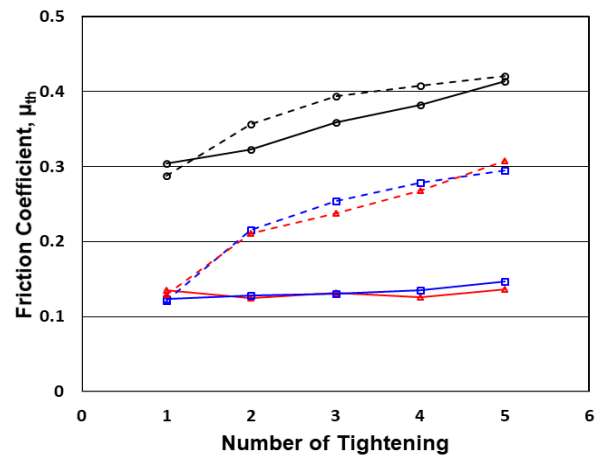
체결 초기 체결토크가 약 1.0 Nm 이하에서 토크가 증가하지만 축력이 발생하는 않는 영역 있다. 이것은 잠김너트의 나사면에서 소성변형이 발생하면서 나타나는 현상으로 이것을 프리베일링 토크 (prevailing torque)라 한다. Table 4는 측정된 프리베일링 토크를

Table 4 Prevailing torque

Bolt size	Specimen number	Prevailing torque [Nm]
M5	#3	0.83
	#4	0.85
	#6	0.86
M6	#9	1.12
	#10	1.11
	#12	1.15



(a) M5

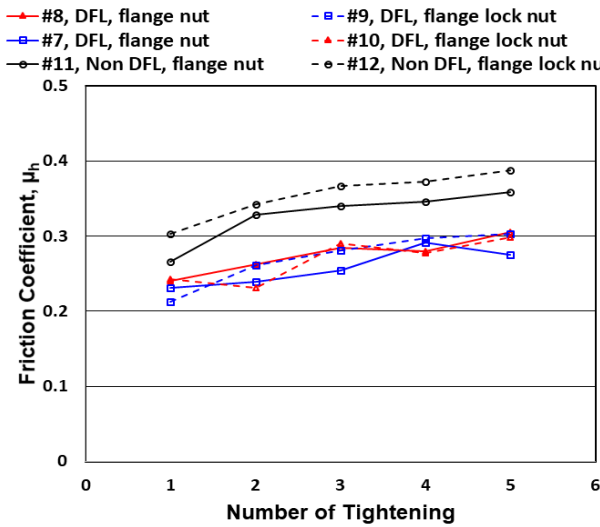


(b) M6

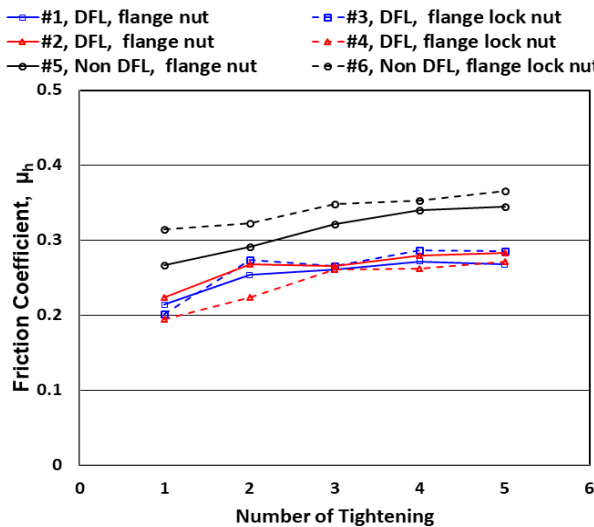
Fig. 9 Effect of re-tightening on the thread coefficient

정리한 것이다. 프리베일링 토크는 코팅 적용과 관계없이 볼트 크기에 의존하는 것으로 보인다.

Fig. 7, 8(a)는 토크-축력 관계를 보여준다. 축력은 코팅이 적용된 볼트가 적용되지 않은 볼트보다 동일한 토크에서 M5 볼트는



(a) M5



(b) M6

Fig. 10 Effect of re-tightening on the head coefficient

약 193% 이상 M6 볼트는 153% 이상 높은 축력이 발생하며, 육각 플랜지 너트를 적용했을 때 보다 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞의 경우와 동일하게 코팅이 적용되지 않은 볼트의 마찰계수가 더 높기 때문이다.

Fig. 7, 8(b)는 프리베일링 토크 이후의 나사면 마찰계수의 변화를 보여 준다. 나사면의 마찰계수는 코팅이 적용된 것과 안 된 것 모두 육각플랜지 너트 조합보다 나사면의 마찰계수가 더 낮게 측정되었다. 하지만 육각플랜지 잠김너트 조합의 경우 체결 과정 중 마찰계수의 상승폭은 더 컸을 뿐만 아니라, 코팅이 적용된 볼트는 육각플랜지 너트 조합의 결과와 다르게 체결 과정 중 마찰계수가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 육각플랜지 잠김너트로 인해 발생하는 소성변형으로 나사면의 형상뿐만 아니라 코팅에도 심한 손상이 발생하고 있음을 보여준다. Fig. 7, 8(c)는 자리면의 마찰계

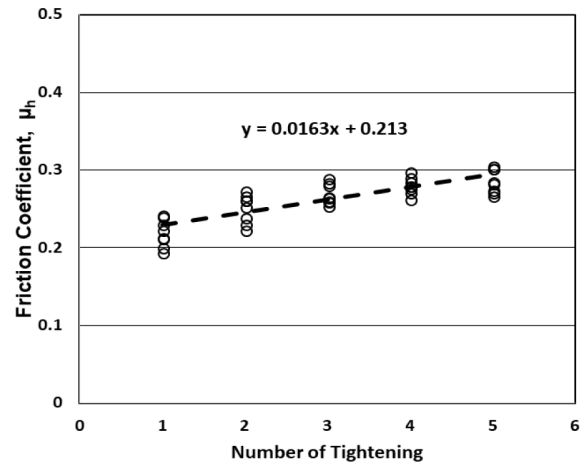


Fig. 11 Plot of head coefficient changes of all tested bolts due to re-tightening

수 변화를 보여준다. 자리면의 마찰계수는 육각플랜지 너트를 적용했을 때와 동일한 경향을 보인다. 체결이 진행되면서 마찰계수가 상승하며, 증가량 또한 육각플랜지 너트를 적용한 경우와 비슷하다.

Fig. 9는 M5, M6 볼트의 풀림과 체결을 5회 반복하면서 나사면의 마찰계수 변화를 보여준다. 마찰계수 값은 토크가 완전히 적용되었을 때를 기준으로 정리하였다. 육각플랜지 너트와 건식윤활코팅이 적용된 M5, M6 볼트의 조합은 체결이 반복되어도 마찰계수가 일정하다. 하지만 육각플랜지 잠김너트 조합은 코팅의 유무와 관계없이 풀림과 체결이 반복될수록 마찰계수가 급격히 상승하는 경향을 보이며, 특히 코팅이 적용된 볼트가 상승량이 크다. 이것은 앞에서 언급한 것과 같이 프리베일링 토크 발생 시 소성변형에 의해 코팅뿐만 아니라 나사면까지 손상이 발생하는 것을 의미한다. 또한 코팅이 적용되지 않은 볼트는 너트의 종류에 상관없이 체결과 풀림이 반복되면 나사면의 마찰계수는 상승한다.

Fig. 10은 풀림과 체결을 5회 반복하면서 자리면의 마찰계수 변화를 보여준다. 자리면의 마찰계수는 모든 경우에서 상승한다. 특히 코팅이 적용된 볼트는 체결 반복 횟수에 따라 자리면의 마찰계수 증가량은 너트의 종류에 의존하지 않는 것으로 파악되며, 체결 횟수와 자리면의 마찰계수 변화가 선형성을 보인다. Fig. 11은 코팅이 적용된 볼트의 자리면 마찰계수 변화의 선형성을 보여준다.

위 결과를 종합해 보면 건식윤활코팅이 적용된 볼트와 육각플랜지 너트 조합은 체결과 풀림이 반복되어도 나사면의 마찰계수가 거의 변하지 않으며, 자리면의 마찰계수는 체결 횟수에 따라 선형적으로 상승한다. 이러한 특성을 이용하여 일정 횟수 이내에서 반복적인 체결이 수행되어도 선정된 축력에 맞는 체결토크를 산출할 수 있을 것이다. 하지만 육각플랜지 잠김너트가 적용되었을 경우는 코팅의 손상이 불가피하며 2회 이상 재사용은 부적절 한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

M5, M6 볼트에 육각플랜지 너트와 육각플랜지 잠김너트를 각각 적용하여 체결 과정 중 마찰계수의 변화를 실시간으로 측정하고 풀림과 체결을 반복하며 마찰계수 변화를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 건식윤활코팅은 디크로나이트사의 DL-5공정을 적용하였으며, 접착력 시험과 두께 측정을 수행하였다.

(2) 동일한 토크에서 건식윤활코팅이 적용된 볼트가 코팅이 적용되지 않은 볼트보다 축력이 높다. 이것은 건식윤활코팅이 볼트의 마찰계수를 낮추기 때문이다.

(3) 육각플랜지 너트와 볼트의 조합으로 시험한 결과 건식윤활코팅이 적용되지 않은 볼트는 나사면의 마찰계수가 풀림과 체결을 반복할수록 상승하였다. 하지만 건식윤활코팅이 적용된 볼트의 나사면은 풀림과 체결을 반복하여도 마찰계수가 일정하게 유지되었다. 육각플랜지 잠김너트는 나사산의 소성변형을 일으키기 때문에 코팅 적용과 관계없이 체결이 반복될수록 나사산의 마찰계수는 급격히 상승하는 것으로 보인다.

(4) 육각플랜지 잠김너트에서 발생하는 프리베일링 토크는 건식윤활코팅 적용과 관계없이 볼트 크기에 의존하는 것으로 보인다.

(5) 볼트 자리면의 마찰계수는 건식윤활코팅이 적용되어 있어도 마찰계수가 상승하였다. 하지만 체결 반복 횟수에 따른 마찰계수의 변화는 선형성을 보였다.

(6) 육각플랜지 너트와 건식윤활코팅이 적용된 볼트의 조합은 나사면과 자리면의 체결 횟수에 따른 마찰계수의 변화 특성을 이용하여 최적의 축력을 발생시킬 수 있을 것이다. 하지만 육각플랜지 잠김너트의 경우 급격한 마찰계수의 변화로 인하여 2회 이상의 재사용은 부적합한 것으로 판단된다.

#### References

- [1] Jung, H. S., Han, H. S., Jo, J. W., Park, S. W., 2018, Study on Member Stiffness of Bolt Joint Structure, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 27:3 167-174.
- [2] Shigley, J. E., Mischke, C. R., 1989, *Mechanical Engineering Design* 5th Edition, McGraw-Hill, New York.
- [3] Bickford, J. H., 2007, *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints* 4th Edition, CRC Press, New York.
- [4] Cho, S. S., Shin, C. S., 2010, Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of Bolt Tightened in Plastic Region, *Transactions of KSAE*, 18:3 37-42.
- [5] Ahn, H. S., 2007, Tribological Behavior of Si-DLC/DLC Coatings with Various Si Contents, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 16:6 212-216.
- [6] Ahn, S. W., Jeong, Y. H., Song, C. K., 2013, Investigation of Friction Hysteresis in Miniaturized Linear Table Lubricated With Grease, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22:4 761-766.
- [7] Morgan, R. C., Henshall, J. L., 1996, The Torque-Tension Behaviour of 22 x 1.5 mm Bolts for Fixing Spigot-Located Wheels on Heavy Commercial Vehicles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 210:3 209-214.
- [8] Park, T. W., Shin, G. S., Jiang, Y., Zhang, M., 2003, The Friction Properties on the Loosening of Bolted Joints (I : Thread Friction Experiments), *Journal of the Korean of Safety*, 18:2 1-5.
- [9] Park, T. W., Shin, G. S., Jiang, Y., 2004, The Friction Characteristics on the Loosening of Bolted Joints (II, Nut - Washer Bearing Friction Experiments), *Journal of the Korean of Safety*, 19:1 12-17.
- [10] Crococolo, D., De Agostinis, M., Fini, S., Olmi, G., 2018, An Experimental Study on the Response of a Threadlocker, Involving Different Materials, Screw Dimensions and Thread Proportioning, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83 116-122.
- [11] Crococolo, D., De Agostinis, M., Fini, S., Olmi, G., 2017, Tribological Properties of Bolts Depending on Different Screw Coatings and Lubrications: an Experimental Study, *Tribology International*, 107 199-205.
- [12] Nassar, S. A., Zaki, A. M., 2009, Effect of Coating Thickness on the Friction Coefficients and Torque-Tension Relationship in Threaded Fasteners, *ASME Journal of Tribology*, 131(2) 021301 1-11.
- [13] Eccles, W., Sherrington, I., Arnell, R. D., 2010, Frictional Changes During Repeated Tightening of Zinc Plated Threaded Fasteners, *Tribology International*, 43 700-707.
- [14] Hukuoka, T., Takaki, T., 1998, Mechanical Behaviors of Bolted Joint During Tightening Using Torque Control, *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 41:2 185-191.
- [15] Kenar, J. A., Felker, F. C., Girma Biresaw, G., Kurth, T. L., 2009, Properties of Dry Film Lubricants Prepared by Spray Application of Aqueous Starch-Oil Composites, *Industrial Crops and Products*, 29:1 45-52.
- [16] Bruce, R. W., 2012, *Hand Book of Lubrication and Tribology Theory and Design* Vol. II Second Edition, CRC Press, London.
- [17] ASTM 1998, *Standard Test Method for Adhesion of Solid Film Lubricants*, Designation: D 2510 - 94, ASTM International, Pennsylvania.
- [18] ISO, 2005, *Fasteners-Torque/Clamp Force Testing*, ISO 16047: 2005(E), International Organization for Standardization, Geneva.