



## 드론 구동모터 체결용 알루미늄 풀림방지너트 개발 및 성능분석

김기성<sup>a</sup>, 정희종<sup>b</sup>, 신응수<sup>a\*</sup>

## Development and Performance Validation of Aluminum Anti-loosening Nuts for Fastening Drone's Drive Motors

Kee-Sung Kim<sup>a</sup>, Hui-Jong Jeong<sup>b</sup>, Eung-Soo Shin<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University<sup>b</sup> Production Engineering Team, Viblock Company

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 20 October 2021

Revised 12 November 2021

Accepted 16 November 2021

## Keywords:

Drone motor

Aluminium nut

Single-slot

Anti-loosening

Box-Behnken

Dynamic characteristics

## ABSTRACT

In this study, an aluminum anti-loosening nut was developed for fastening a drone motor, and its performance was experimentally validated. The Box-Behnken method combined with nut-tightening analyses was applied to determine the optimum values of nut parameters including the base angle, slot height, and depth. An experiment was conducted to validate the anti-loosening performance of two types of nut prototypes under the vibration excitation of a hexacopter. It was noted that, compared to a normal nut, the single-slot nut prototypes improved the performance by a maximum of 11%. It was also observed that the anti-loosening performance estimated at the design stage agreed well with experimentally measured results.

## 1. 서론

군사용 목적으로 개발된 드론의 활용 분야가 물류, 농업, 측량, 통신 등 다양한 산업 분야로 확장됨에 따라 그 수요가 급증하고 있으며 개인 레저용의 소형 드론 수요까지 폭발적으로 증가하고 있다. 이러한 드론 수요의 급증은 관련 산업의 새로운 변화와 발전을 촉진하는 계기가 되는 반면에 비행 중 발생하는 다양한 형태의 사고로 인하여 안전상의 심각한 문제를 초래할 수 있다<sup>[1]</sup>. 드론 사고의 원인으로는 구조적 결함에서부터 비행제어 오류에 이르기까지 다양한데 그 중에서도 부품과 부품간 체결의 풀림에 의한 사고가 매우 빈번하게 발생하고 있다<sup>[2]</sup>. 최근 들어 배터리 기술의 발전으로 드론의 비행 시간이 크게 늘어남에 따라 체결요소의 풀림에

의한 안전 사고의 가능성은 더욱 높아지고 있다. 이와 관련하여 드론 비행 중 실시간 모니터링을 통하여 체결 상태를 감지하는 방안에 관한 연구와<sup>[3,4]</sup> 풀림방지 성능을 갖춘 체결 요소의 개발에 관한 연구가 진행되어 왔다<sup>[5]</sup>.

일반 기계 부품의 체결에 적용할 수 있는 풀림방지 방식은 매우 다양하게 개발되어 있지만<sup>[6,7]</sup> 드론에 적용하기에는 구조가 복잡하거나 경량화 관점에서 부적합하다. 드론에 적용 가능한 가장 대표적인 풀림방지 방식은 접착력이 있는 나일론을 너트 내부에 삽입한 것으로 풀림방지와 경량화 측면에서는 효과적이지만 내구성이 떨어지는 문제점이 있다<sup>[8]</sup>.

본 연구에서는 알루미늄 재질로 횡방향 슬롯이 있는 풀림방지 너트를 개발하고 드론 구동 모터의 체결에 적용하여 성능을 분석

\* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-3159

E-mail address: [esshin@cbnu.ac.kr](mailto:esshin@cbnu.ac.kr) (Eung-Soo Shin).

하고자 한다. 재질이 알루미늄이므로 경량화 관점에서 드론에 적합하고 단슬롯 너트의 형상이 단순하면서도 풀림방지 성능을 향상시킬 수 있다는 특징이 있다<sup>[9]</sup>.

## 2. 알루미늄 풀림방지 너트 설계

### 2.1 알루미늄 단슬롯 너트 설계의 기본개념

볼트와 너트에 의한 체결에서 너트 토크는 나사산 및 밀면에서의 마찰에 의해 결정되는데 일반 너트에서는 볼트 체결력이 주어진 경우 나사산 형상, 너트 유효반경 및 마찰계수에 따라 그 크기가 정해진다<sup>[10]</sup>. 반면에 풀림방지 너트에서는 초기 토크(prevaling torque)를 도입함으로써 마찰 부위에서 수직반력을 증가되고 결과적으로 너트 풀림을 억제할 수 있는 토크 상승이 발생한다.

본 연구의 알루미늄 너트는 SUS 계열 및 SM45C 재질의 너트에 비해 강도가 낮고 변형은 크다는 특성이 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 너트에 슬롯을 도입하고 초기 장력 대신 슬롯 상부에는 초기 변형을 주고 너트 밀면에 경사를 뒀으로써 슬롯 하부가 체결과정에서 큰 변형이 발생하고 그에 따른 마찰력이 상승한다<sup>[11]</sup>. 또한 나사산 형상은 일반 너트와 동일하게 함으로써 체결 초기에 나사산 겹침에 의한 조립의 어려움이 없다는 특징이 있다.

따라서 Fig. 1의 단슬롯 너트의 설계 핵심은 슬롯에 의한 너트 상하부의 변형을 극대화하는 것이며 이는 슬롯의 형상에 의해 크게 좌우된다. Fig. 2는 설계 변수를 나타낸 것으로 슬롯 깊이  $D$ , 슬롯 높이  $H$ , 밀면 경사각  $\theta$ 의 3개 변수를 설정하였다. 너트 형상과 관련한 기타 제원은 M6 규격과 동일하며 다만 슬롯 두께의 경우 0.5 mm의 상수로 설정하였다.

설계 변수 값을 결정하기 위하여 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 체결해석을 수행하였는데 볼트는 슬롯이 있는 너트에 비해 상대적

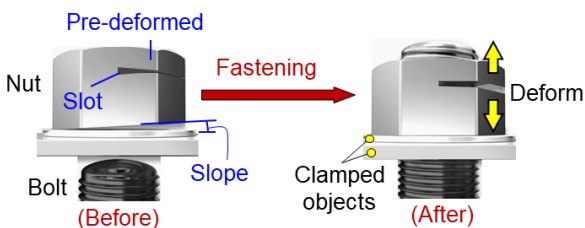


Fig. 1 Anti-loosening concept of an aluminum nut

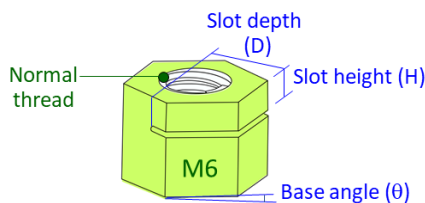


Fig. 2 Definition of design variables

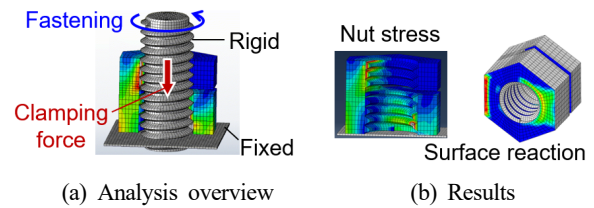


Fig. 3 Estimation of the nut torque<sup>[9]</sup>

Table 1 Material properties of AL7075-T651

Young's modulus (GPa)	71.7
Yield strength (MPa)	480
Tensile strength (MPa)	622
Friction coefficient	0.23

강성이 매우 크므로 강체로 가정하였으며 경계 조건으로는 너트 하단의 접촉면을 고정시켰다. 상용 코드 ABAQUS를 이용하여 비선형 접촉해석을 수행하였는데 볼트 회전량을 입력으로 하여 Fig. 3(b)과 같이 너트 나사산에서의 응력과 밀면에서의 반력을 구하고 이를 적분함으로써 너트 나사산과 밀면에서의 마찰에 의한 토크 성분을 각각 구했다. Table 1은 해석에 적용된 AL7075-T651의 재료 물성치이다.

### 2.2 Box-Behnken법에 의한 설계변수 분석

설계 변수가 너트 나사산 및 밀면에서의 토크 값에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 2에 정리한 바와 같이 Box-Behnken법에 의한 실험계획법을 적용하였으며 각 설계 변수는 M6 규격을 고려하여 범위와 수준을 정하였다. Fig. 3에서 체결력이 5.7 kN에 도달할 때의 토크 값을 산출하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 2 Design of experiments by Box-Behnken

DOE no.	Design variables					
	Actual			Normalized		
	$\theta$ (°)	H (mm)	D (mm)	$x_\theta$	$x_H$	$x_D$
1	1	2.2	5.7	-1	-1	0
2	3	2.2	5.7	1	-1	0
3	1	3.8	5.7	-1	1	0
4	3	3.8	5.7	1	1	0
5	1	3.0	4.7	-1	0	-1
6	3	3.0	4.7	1	0	-1
7	1	3.0	6.7	-1	0	1
8	3	3.0	6.7	1	0	1
9	2	2.2	4.7	0	-1	-1
10	2	3.8	4.7	0	1	-1
11	2	2.2	6.7	0	-1	1
12	2	3.8	6.7	0	1	1
13	2	3.0	5.7	0	0	0

Table 3 Estimation of the nut torques

DOE no.	Absolute (Nm)		Relative (%)	
	Thread	Base	Thread	Base
1	2.598	2.946	16.89	10.51
2	2.643	3.146	19.22	17.02
3	2.618	2.952	17.96	10.71
4	2.645	3.145	19.37	17.01
5	2.646	2.953	19.38	10.74
6	2.675	3.146	20.88	17.03
7	2.580	2.962	16.01	11.03
8	2.622	3.146	18.13	17.04
9	2.663	3.127	20.29	16.40
10	2.725	3.124	23.48	16.32
11	2.634	3.124	18.77	16.30
12	2.603	3.125	17.19	16.35
13	2.628	3.121	18.46	16.21

여기서 상대 토크는 슬롯이 없는 동일 재질의 M6 너트 토크에 대한 단슬롯 너트의 토크 상승폭을 백분율로 나타낸 것으로서 단슬롯 너트의 풀림방지 성능 지수  $P_I$ 에 해당한다.

$$P_I = \frac{T_a^S - T_a^N}{T_a^N} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 4는 성능 지수를 설계 변수  $\theta$ ,  $H$ ,  $D$ 의 변화에 대해 도시한 것으로 나사산 토크의 상승폭  $\Delta T_t$ 와 밀면 토크 상승폭  $\Delta T_b$ 로 구분하여 각각에 대해 설계변수와와의 상관 관계를 구했다. Fig. 4(a)는 설계 변수  $\theta$ 의 변화에 따른  $\Delta T_t$ 와  $\Delta T_b$ 를 도시한 것으로 빗금으로 나타낸 영역의 위쪽 경계는  $\Delta T_t$ , 아래쪽 경계는  $\Delta T_b$ 에 해당한다. 모든  $\theta$ 값에 대해  $\Delta T_t$ 가  $\Delta T_b$ 보다 크다는 것은  $\theta$ 가 나사산 토크를 증가시키는 효과가 밀면 토크를 증가시키는 효과보다 크다는 것을 의미한다. 실제 너트에서는  $\Delta T_t$ 와  $\Delta T_b$ 가 복합적으로 작용하므로 풀림방지 성능은 영역 내에 존재하게 된다.

Fig. 4(a)에서  $\theta$ 의 증가에 따라  $\Delta T_t$ 의 증가하는 것은 체결 과정에서 볼트 회전에 따른 너트 상하부 나사산에서의 결합량이 늘어나면서 나사산 마찰력이 커지기 때문이다. 또한  $\theta$ 의 증가에 따른  $\Delta T_b$ 의 변화도 유사한데  $\theta$ 가 커질수록 너트 밀면의 반력 분포가 비대칭화하면서 접촉면의 유효 반경이 커져  $\Delta T_b$ 가 증가하는 것으로 보인다.

Fig. 4(b), (c)는 설계 변수  $H$ ,  $D$ 와 성능 지수의 관계를 도시한 것인데  $H$ 와  $D$ 가  $\Delta T_b$ 에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 우선적으로 확인할 수 있다. 즉, 너트 밀면의 수직 반력 분포는 슬롯의 높이와 깊이와는 거의 관계가 없다는 것을 의미한다. 반면에  $\Delta T_t$ 는  $H$ 와  $D$ 가 변화함에 따라 크게 달라지는데 Fig. 4(b)를 보면

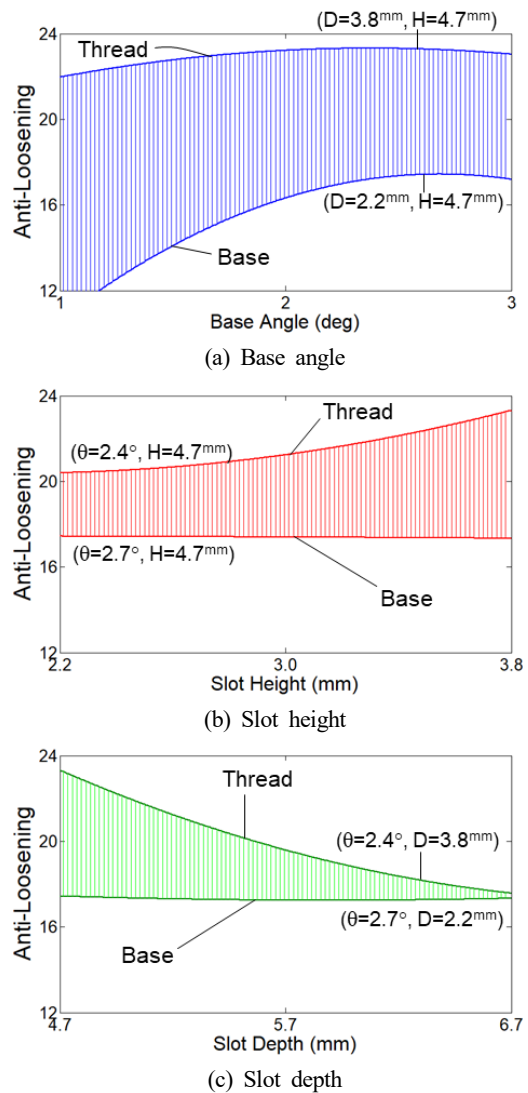


Fig. 4 Anti-loosening performance vs. design variables

$H$ 가 증가할수록  $\Delta T_t$ 도 증가하고 반면에 Fig. 4(c)에서는  $D$ 가 증가할수록  $\Delta T_t$ 는 감소한다. 즉,  $H$ 가 크고  $D$ 가 작다는 것은 너트 상부의 굽힘 강성이 크다는 것이고 체결 과정에서 나사산 수직 반력이 증가하게 되고 나사산 마찰력이 증가되어  $\Delta T_t$ 가 커지게 된다.

위 결과를 요약하면 본 연구에서 단슬롯 너트의 풀림방지 성능은 나사산 토크와 관련된  $\Delta T_t$ 는 설계 변수  $\theta$ ,  $H$ ,  $D$ 의 복합적인 영향을 받으며 큰 폭으로 변하는 반면에 밀면 토크와 관련된  $\Delta T_b$ 는 설계 변수  $\theta$ 의 영향이 절대적이며  $H$ ,  $D$ 의 영향은 거의 없다.

### 2.3 설계변수 최적화

단슬롯 너트의 설계 변수 값을 결정하기 위해서 앞 절의  $\Delta T_t$ 와  $\Delta T_b$ 의 조합으로 아래와 같은 목적 함수를 정의하고 이를 최대화하는  $\theta$ ,  $H$ ,  $D$ 를 구했다.

$$f = \gamma \Delta T_t + (1 - \gamma) \Delta T_b \quad (2)$$

여기서  $\gamma$ 는 너트 토크에서 나사산 토크가 차지하는 비율로서 일반 너트의 경우 다음과 같이 주어진다<sup>[10]</sup>.

$$\gamma = \frac{r_t}{r_t + r_b \cos \alpha} \quad (3)$$

식(2)에서  $r_t$ 는 나사산 반경,  $r_b$ 는 너트 밀면의 유효 반경,  $\alpha$ 는 나사산 각으로서 M6인 경우  $r_t = 3\text{ mm}$ ,  $r_b = 4\text{ mm}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ 이고 이로부터  $\gamma = 0.46$ 이다.

반면에 본 연구의 단슬롯 너트는 Table 3의 결과로부터  $\gamma$ 를 계산하면 Fig. 5와 같이 각 조건마다  $\gamma$ 값이 달리 주어지지만 일반 너트와의 차이가 크지 않다. 따라서 식(2)에  $\gamma = 0.46$ 을 적용하고 최적화를 수행하였다.

Table 4는 그 결과를 정리한 것으로  $\theta = 2.6^\circ$ ,  $H = 3.8\text{ mm}$ ,  $D = 4.7\text{ mm}$ 인 단슬롯 너트의 풀림방지 성능은 일반 너트와 비교하여 20.1% 향상된다. Fig. 6은 최종적으로 도출한 설계 변수를 반응표면과 설계변수 영역에 표시한 것으로서  $H$ 와  $D$ 는 초기에 설정한 범위의 경계 값으로 주어짐을 알 수 있다. 즉, 풀림방지 관점에서 보면  $H$ 는 클수록,  $D$ 는 작을수록 바람직하지만 M6 규격에 기반한 단슬롯 너트이기 때문에 존재하는 기하학적 제한에 의해

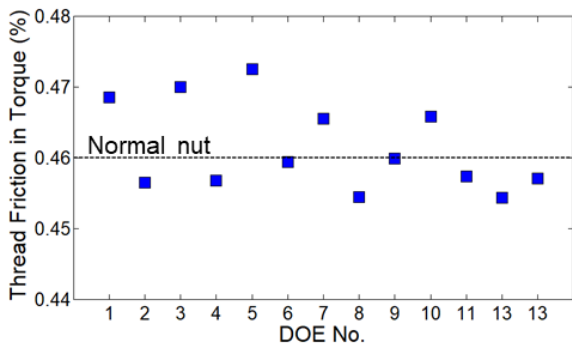


Fig. 5 Thread friction effect in the nut torque

Table 4 Summary of design results

Design variables	Base angle (°)	2.6
	Slot height (mm)	3.8
	Slot depth (mm)	4.7
Nut torque	Thread (Nm)	2.799
	Base (Nm)	3.076
	Total (Nm)	5.876
Anti-loosening performance	Thread (%)	23.2
	Base (%)	17.3
	Total (%)	20.1

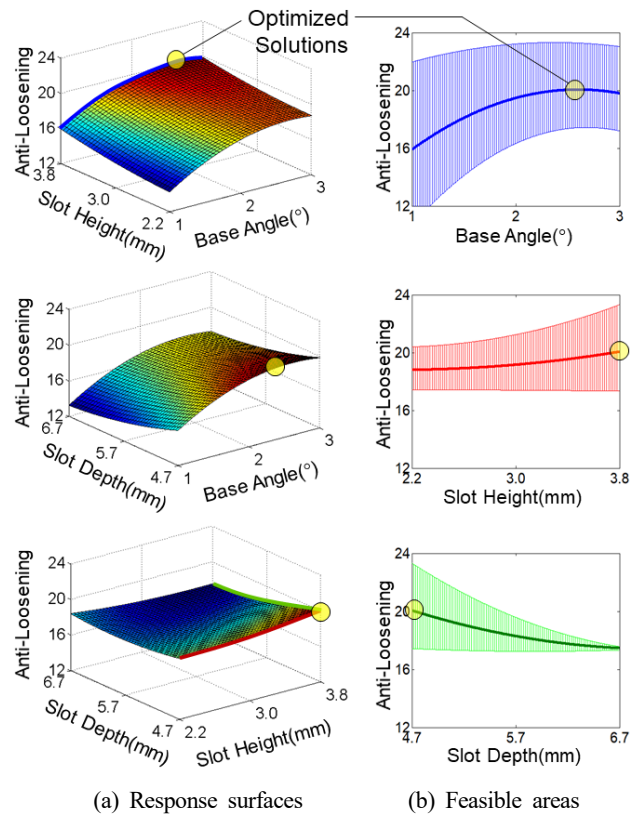


Fig. 6 Determination of design variables

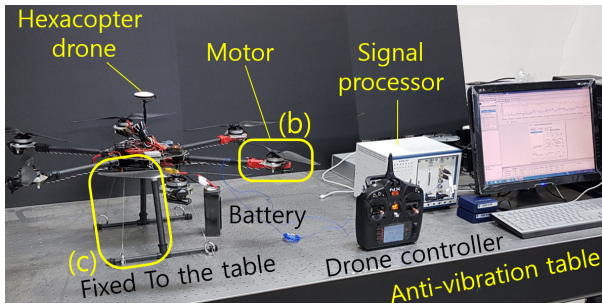
그 값이 결정된다. 반면에 풀림방지 성능에 가장 큰 영향을 주는 밀면각  $\theta$ 는  $1^\circ \sim 2.6^\circ$  범위에서는  $\theta$ 가 커질수록 풀림방지 성능이 향상되지만  $\theta$ 가  $2.6^\circ$ 보다 더 커지면 성능이 감소함을 알 수 있다. 이는  $\theta$ 가 너무 커지면 너트 나사산에서의 과도한 변형과 응력 발생이 발생하고 밀면 접촉 면적의 감소에 따른 유효 반경의 변화에 기인한 것으로 보인다. 다만  $\theta = 2.6^\circ$  부근에서  $\theta$ 의 변화에 대한 풀림방지 성능의 민감도는 매우 작아서  $\theta = 2.6^\circ \pm 0.4^\circ$  범위 내에서 풀림방지 성능의 감소는 0.26%에 불과하다.

### 3. 드론 구동모터 체결너트의 풀림방지 성능 분석

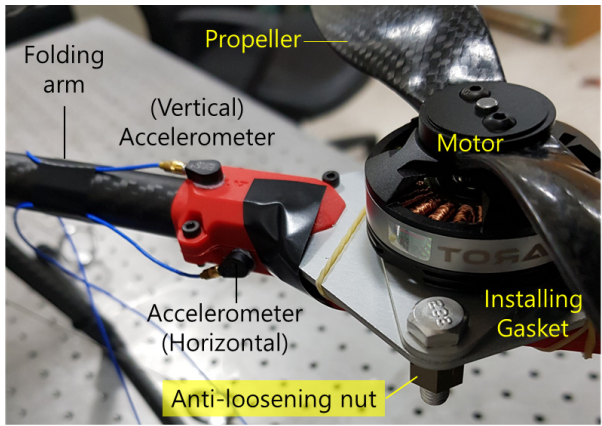
#### 3.1 성능 분석 실험장치

본 연구에서 개발한 알루미늄 단슬롯 너트를 드론 구동부에 적용했을 때의 성능을 분석하기 위하여 Fig. 7과 같이 실험 장치를 구성하였다. 주요 요소로는 헥사콥터 드론, 동특성 측정용 가속도 센서 및 신호처리 시스템이며 각 요소의 사양은 Table 5와 같다.

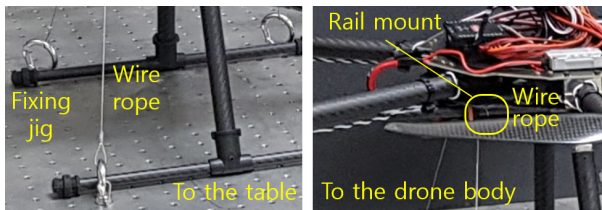
Fig. 7(b)는 단슬롯 너트의 체결 위치를 자세하게 나타낸 것으로 구동 모터와 풀딩 암을 알루미늄 개스킷으로 연결하고 그 끝단에 너트를 부착하였다. 드론 프로펠러의 회전으로부터 야기되는



(a) Overview



(b) Attachment of an anti-loosening nut



(c) Drone support system





Fig. 7 Experimental setup

Table 5 Specifications of the test-rig

Drone	General	Hexacopter (max. speed: 9100 rpm)
	Motor	620 rpm/V, 30.5 mm (Shaft length)
	Battery	22.2 V, 5200 mAh
	Support	Wire rope (SUS, $\phi=0.8$ mm)
Accelerometers	PCB 353C22, 9.86 mV/g (H), 9.75 mV/g (V)	
Signal processing	NI 4475, Labview 7	

진동은 구동 모터를 거쳐 체결 너트에 전달되며 개스킷을 통하여 폴딩 암으로 전파되며 개스킷과 폴딩 암의 연결부위에 부착한 수평 및 수직 가속도계로부터 너트에 가해지는 진동을 측정할 수 있다.

Table 6 Descriptions of test samples

Sample		A	B
Shape parameters	$\theta$ (°)	2.0	3.0
	H (mm)	2.2	3.0
	D (mm)	6.7	4.7
Prototype	Overview		
	Side-view		
Anti-loosening performance (%)	Normal nut	117.6	119.0
	Optimized nut	97.9	99.1

실험은 헥사콥터 드론을 와이어 로프와 고정 지그를 사용하여 방진 테이블에 고정시킨 상태에서 진행하였는데 와이어 로프가 프로펠러 회전에 의한 양력을 상쇄할 수 있는 구속력을 발생시킬 수 있어야 하고 드론의 동특성에 영향을 주지 않도록 본체의 고정 위치를 정해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 방진테이블 상에 지그 네 개를 탭으로 고정하고 드론 본체에는 11 자형 레일 마운트 상의 네 지점을 선택하여 각각을 와이어 로프로 연결하여 구속하였다.

실험용 시편은 Table 6에 정리한 바와 같이 2종류의 단슬롯 너트를 선정하였으며 풀림방지 성능의 비교 분석을 위한 기준으로서 알루미늄 M6의 일반 너트를 추가하여 실험을 수행하였다.

시편 A와 시편 B의 형상 파라미터를 Table 4의 최적 설계 결과와 비교하면 풀림방지 성능 관점에서 시편 A는 97.9%에 해당하고 시편 B는 99.1%에 해당하여 시편 B가 최적 해에 더 가깝다. 형상 파라미터 값의 차이에도 불구하고 설계 단계에서 예측한 풀림방지 성능에 있어 시편 A, B와 최적 해의 차이가 크지 않은 것은 가장 큰 영향을 미치는 파라미터인 밀면각  $\theta$ 가 최적 해에 근접해 있고 앞 장에서 언급한 바와 같이 최적 해 부근에서의 민감도가 작기 때문이다.

### 3.2 드론 동특성 분석에 의한 가진실험 조건 결정

드론 프로펠러의 회전에 의한 진동 하중이 너트의 풀림방지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 너트 체결 부위에서 프로펠러 가진에 의한 진동 응답이 충분히 크거나 가진 시간을 충분히 길게 하여야 한다. 본 연구에서는 프로펠러의 회전속도를 0~3000 rpm까지 서서히 증가시키면서 너트 체결용 개스킷에 발생하는 진동의 가속도를 수평 및 수직 방향에 대해 측정하여 주파수응답함수를 구하고 진동 응답이 커지는 가진주파수 대역을 찾

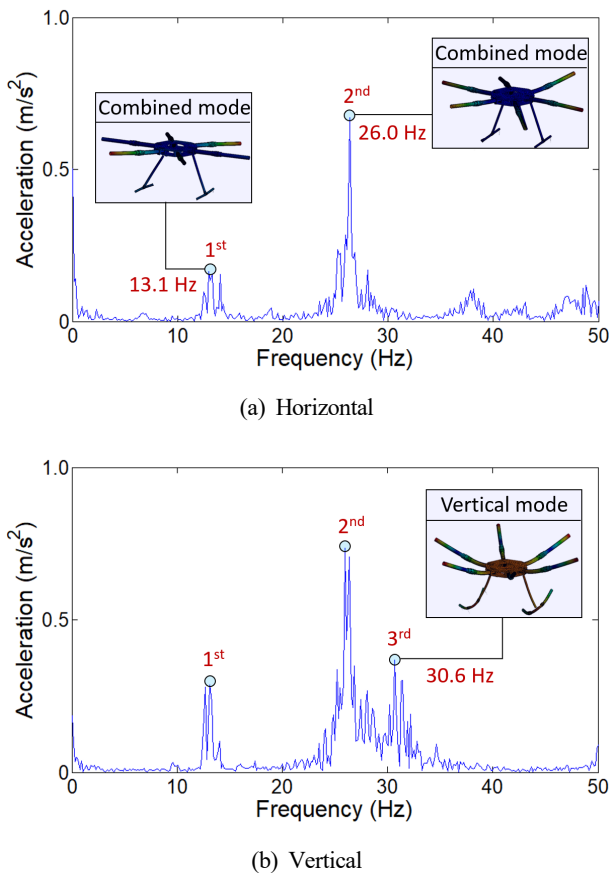


Fig. 8 Frequency responses at the fastening gasket

아 그에 대응하는 프로펠러의 회전속도를 성능실험의 조건으로 정하였다.

Fig. 8은 주파수응답함수를 나타낸 것으로 수평 방향의 경우 50 Hz 이내에 2개의 피크가 발생하는 반면에 수직 방향으로로는 3개의 피크가 나타난다. 피크가 발생하는 주파수를 보면 수평 방향의 1차 및 2차 주파수와 수직 방향의 1차 및 2차 주파수가 거의 일치한다. 즉, 1차 및 2차 피크는 수평 방향 모드와 수직 방향 모드가 상호 연관되어 동시에 응답이 커지는 복합 모드이다. 이러한 복합 모드에 대응하는 주파수로 프로펠러를 회전시키면 너트를 축방향과 횡방향으로 동시에 효과적인 가진을 할 수 있다.

따라서 본 연구에서 드론 모터 체결용 너트의 풀림방지 성능을 분석하기 위한 실험은 다음과 같이 진행하였다. 우선적으로 너트 시편을 모터와 풀딩 암을 연결하는 개스켓에 체결하되 결과의 비교 분석을 위하여 체결 토크는 모든 시편에 대해 3 Nm을 적용하였다. 그 다음으로 드론 제어장치를 통하여 프로펠러의 회전 속도를 Fig. 8의 주파수응답함수의 2차 피크가 발생하는 주파수 대역인 1500 rpm의 일정 속도로 3분간 가진한 후 모터를 정지하고 너트 시편의 풀림 토크를 측정하였다.

Table 7 Summary of the test results

Release torque		1st	2nd
Measured torque (Nm)	Normal	1.87	1.79
	Sample A	1.94	1.83
	Sample B	2.08	1.87
Improvement (%)	Sample A	3.74	2.23
	Sample B	11.23	4.47

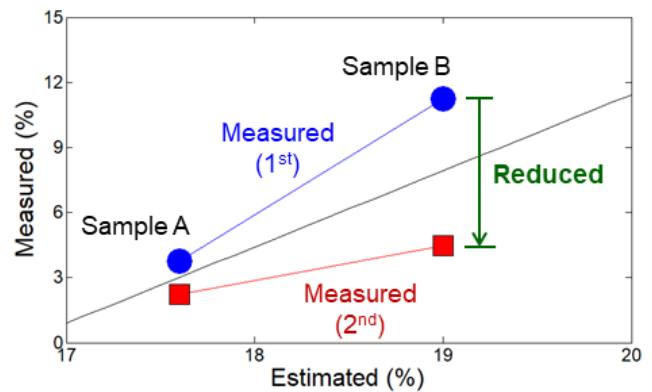


Fig. 9 Anti-loosening performance

### 3.3 풀림방지 성능 실험 결과 분석

Table 7은 앞 절의 가진 실험의 결과로 얻은 풀림 토크를 정리한 것으로 각 너트 시편에 대해 체결 → 가진 → 풀림토크 측정을 2회 반복하여 실험하였다. 그 결과를 보면 본 연구의 단슬롯 너트는 모든 측정 결과에서 일반 너트에 비해 풀림토크가 커지는데 너트 슬롯 상하부의 변형 증가를 통해서 너트 토크를 상승시킨다는 단슬롯 너트의 설계 개념이 드론 구동 모터의 체결에서 효과적으로 구현된다는 것을 확인할 수 있다.

단슬롯 너트의 형상 차이에 따른 성능을 비교하면 1차 체결 실험에서 풀림방지 성능이 시편 A는 일반 너트와 대비하여 3.74% 향상되었고 시편 B는 11.23% 향상되었다. 이는 시편 설계 단계에서 시편 A보다 시편 B가 성능이 우수하다는 Table 6의 결과와 일치한다.

물론 Table 6의 설계 단계에서는 볼트 체결력 5.7 kN을 기준으로 너트의 풀림방지 성능을 비교한 반면에 성능 실험에서는 3 Nm의 체결 토크를 기준으로 비교하였기 때문에 절대 수치적으로 성능 향상 정도를 비교하기는 어렵다. 하지만 Fig. 9와 같이 상대적 비교를 통해서 설계 예측치와 실험 측정 결과의 상관 관계를 분석할 수 있다. Fig. 9에서 가로 축은 설계 상의 풀림방지 성능을 나타내고 세로 축은 실험으로 측정된 풀림방지 성능에 해당하는데 설계 예측 성능이 우수할수록 실험 측정 성능도 우수함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 단슬롯 너트의 형상 파라미터를 결정하기 위

한 체결 해석은 타당했다고 할 수 있다.

또한 Fig. 9에서 2차 체결 실험의 풀림방지 성능은 시편 A와 시편 B 모두에서 1차 결과에 비해 감소하며 시편 B의 감소 폭이 더 크게 나타난다. 이러한 현상은 2차 체결 시 너트 나사산 및 밀면에서의 마찰 특성이 1차 체결과 차이가 나기 때문으로 보이며 나사산 변형량이 크고 밀면 응력 집중이 발생함으로 인해 마찰 면의 손상 등이 일어난 것으로 보인다. 시편 B의 경우 1차 체결 시 풀림방지 성능의 향상이 11.23%로 시편 A의 3.74%에 비해 훨씬 우수하나 그만큼 변형과 응력 집중이 더 크게 일어났기 때문에 2차 체결 시의 성능 감소 폭은 상대적으로 훨씬 크다.

따라서 본 연구의 단슬롯 너트를 실제 드론의 구동 모터에 적용하기 위해서는 재사용성에 관한 고려가 추가적으로 필요하며 너트의 체결 토크, 너트 나사산 및 체결 조인트의 표면 처리 등에 관한 세부적인 고찰이 향후 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가볍고 구조가 간단하면서 풀림방지 성능이 우수한 알루미늄 단슬롯 너트를 드론 구동모터 체결용으로 개발하고 그 성능을 검증하였다. Box-Behnken법과 너트 체결 해석을 통하여 슬롯의 형상 파라미터가 풀림방지 성능에 미치는 영향을 분석하였으며 hex코퍼 드론에 단슬롯 너트 시제품을 장착하여 가진 실험 후 풀림토크를 측정하고 그 결과를 일반 너트와 비교 분석함으로써 단슬롯 너트의 풀림방지 성능을 검증하고 너트 형상이 성능에 미치는 영향에 관한 설계 분석의 타당성을 검증하였다.

그 결과 슬롯 상하부의 변형 증가에 통한 풀림방지 구현이라는 단슬롯 너트의 설계 개념이 효과적으로 나타나는 것을 실험 결과로 확인할 수 있었으며 일반 너트와 비교하여 최대 11% 성능이 향상되었다. 또한 너트의 형상 파라미터가 풀림방지 성능에 미치는 영향에 관한 설계 단계에서의 예측이 실험 결과와 부합하였다.

반면에 단슬롯 너트는 체결과 풀림을 반복할 경우 풀림방지 성능이 저하하는 문제점이 있으며 풀림방지 성능이 우수할수록 재사용성이 상대적으로 더 크게 감소하는 특징이 있음을 실험 결과로부터 확인하였다. 본 연구에서 개발한 알루미늄 단슬롯 너트는 기존의 나일론 너트에 비해 풀림방지 성능이 우수하고 장시간 사용 가능하다는 장점이 있지만 재사용성에 관해서는 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 따라서 드론 구동모터 체결에 실제 적용하기 위해서는 재사용성을 개선할 수 있는 체결 조건에 관한 추가적 연구가 필요하다.

#### References

- [1] Kwan, C., 2021, Safety Enhancement of UAVs from the Signal Processing's Perspectives: A Bird's Eye View, *Drones*, 5:1 16, <https://doi.org/10.3390/drones5010016>.
- [2] Yoo, J., 2018, Technology Trend of Bolt Locking Methods, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 16:1 111-117.
- [3] Na, W. S., Baek, J., 2017, Impedance-based Non-destructive Testing Method Combined with Unmanned Aerial Vehicle for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures, *Appl. Sci.*, 7:1 15, <https://doi.org/10.3390/app7010015>.
- [4] Lee, S. Y., Kang, H. S., Cha, M. C., Kim, D. Y., Park, Y. K., Jeong, H. J., Lee, E. S., 2018, A Study of Nut Loosening Inspection Using a Vision Machine Method, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:1 35-40, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.1.35>.
- [5] Gong, H., Liu, J., Feng, H., 2021, Review on Anti-loosening Methods for Threaded Fasteners, *Chinese J. Aeronautics*, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.038>.
- [6] Liu, X., Noda, N. A., Sano, Y., Huang, Y. T., Takase, Y., 2018, 3D Finite Element Analysis of Tightening Process of Bolt and Nut Connections with Pitch Difference, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 372 012006, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/372/1/012006>.
- [7] Choi, J. Y., Woo, J., Kang, D., Kim, J. H., Cho, J. Y., Jang, S. G., Yang, H. W., 2018, Bolt Loosening Analysis under Transverse Vibration for Design of Reliable Pyrotechnic Separation Nut, *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, 46:12 1004-1011, <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.12.1004>.
- [8] Saha, S., Srimani, S., Hajra, S., Bhattacharya, A., Das, S., 2007, On the Anti-Loosening Property of Different Fasteners, 13th National Conference on Mechanisms and Machines, 229-232.
- [9] Kim, K., Eom, D. S., Jeong, H. J., Shin, E. S., 2020, Effect of a Single-Slot Nut's Shape on the Anti-Loosening Performance, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 29:6 449-456, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.6.449>.
- [10] Fernando, S., 2001, An Engineering Insight to the Fundamental Behavior of Tensile Bolted Joints, *Steel Construction*, 35:1 2-13.
- [11] Crococolo, D., De Agostinis, M., Vincenzi, N., 2010, Experimental Study of Friction in Aluminium Bolted Joints, *EPJ Web of Conf.*, 6 08003, <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100608003>.



**Kee-Sung Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is Vibration.  
E-mail: gsk0221@daum.net



**Hui-Jong Jeong**

General Manager in the Production Engineering Team, Viblock Company.  
His research interest is Vibration.  
E-mail: jongworks@viblock.co.kr



**Eung-Soo Shin**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is vibration.  
E-mail: esshin@chungbuk.ac.kr