

## 초소형 나사의 나사산 각도변화에 따른 체결특성 평가

### Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws According to Thread Angle Variation

민경빈<sup>1</sup>, 김종봉<sup>2</sup>, 박근<sup>1,✉</sup>, 나승우<sup>3</sup>  
Kyeong Bin Min<sup>1</sup>, Jong Bong Kim<sup>2</sup>, Keun Park<sup>1,✉</sup>, and Seung Woo Ra<sup>3</sup>

1 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

2 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

3 ㈜서울금속 기술연구소 (Research Center, Seoul Metal Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: kpark@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6358

Manuscript received: 2014.3.3 / Revised: 2014.7.7 / Accepted: 2014.8.8

*Recent trends in the miniaturization and weight reduction of portable electronic parts have driven the use of subminiature screws with a micrometer-scale pitch. As both screw length and pitch decrease in subminiature screws, the resulting clamping force becomes diminishes. In this work, Finite element (FE) analysis is performed to evaluate clamping force of a screw assembly, with a comparison with experimental result. To improve clamping force of subminiature screws, a new screw design is considered by modifying screw thread angle: the thread angle is varied as an asymmetric way unlike the conventional symmetric thread angle. FE analyses are then performed to compare the clamping characteristics of each subminiature screw with different thread angle. The effect of thread angles on the clamping force is then discussed in terms of structural safety for both positive and negative screws.*

Key Words: Subminiature Screw (초소형 나사), Finite Element Analysis (유한요소해석), Clamping Force (체결력), Asymmetric Screw Threads (비대칭 나사산), Preload (초기하중)

#### 기호설명

$T$  = applied torque

$Q$  = axial tensile force

$d_p$  = pitch diameter of the positive screw

$d_n$  = diameter of the negative screw

$\beta$  = screw lead angle

$\rho$  = friction angle

$\mu_p$  = friction coefficient of the positive screw

$\mu_n$  = friction coefficient of the negative screw

$\theta$  = deviation of asymmetric angle

#### 1. 서론

나사(Screw)는 나선형의 나사산과 골을 이용하여 다수개의 부품을 고정시키는 목적으로 사용되

는 부품으로 자동차, 전자, 기계부품 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다. 최근에 스마트폰 등 이동통신기기의 소형화 및 경량화가 추세에 따라 나사 등의 체결부품 또한 크기와 개수를 줄여야 하는 수요에 직면하고 있으며, 직경 1 mm 내외의 초소형 나사(Subminiature screw)에 대한 수요가 증가하고 있다.<sup>1</sup> 나사의 크기가 감소될 경우 체결부의 접촉 면적 및 체결되는 나사산의 개수가 감소하게 되어 체결특성이 저하될 것으로 예상되는데, 이러한 문제점을 해결하기 위해 초소형 나사의 체결력을 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

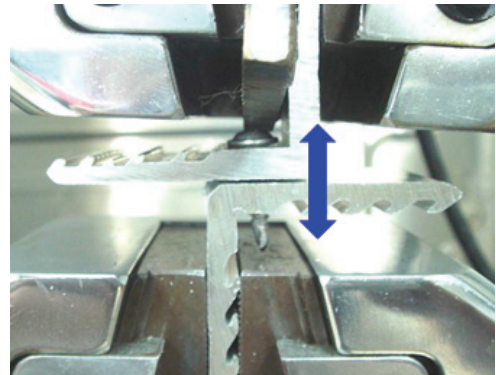
나사 체결력을 향상시키기 위하여 일반적으로 와셔(Washer) 또는 접착제 등이 사용되고 있다.<sup>2</sup> 또한 체결부 마찰과 체결력의 관계에 대한 연구도 진행되고 있으며,<sup>3,5</sup> 고장력 볼트를 개선하기 위하여 나사의 치수를 변화시키고 유한요소해석을 통하여 응력분포를 연구한 사례도 발표되었다.<sup>6</sup> 최근에는 높은 체결력을 갖기 위한 최적의 조임토크 설정에 대한 연구도 수행된 바 있다.<sup>7</sup>

본 연구에서는 초소형 나사의 체결력을 평가하고 나사산의 설계변경이 체결력 변화에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구를 진행하고자 한다. 이를 위해 기존에 사용되고 있는 소형 나사를 대상으로 체결력 평가시험을 진행하고, 유한요소해석(Finite element analysis)을 사용하여 체결력 시험과정의 전산모사를 수행하도록 한다. 또한 기존의 나사산 형상과는 다른 비대칭 나사산 형상을 제안하고 유한요소해석을 통해 나사산 각도변화에 따른 체결특성을 비교하고자 한다.

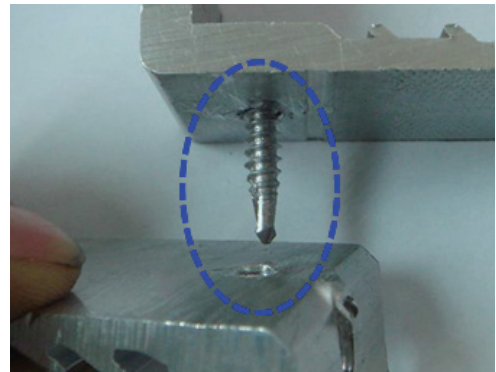
## 2. 소형 나사 체결력 평가시험의 전산모사

### 2.1 소형 나사 체결력 평가시험

나사 체결력의 측정을 위한 평가시험을 진행하였다. 체결력 평가시험은 수나사와 암나사가 체결되어 있는 상태로 진행하였으며, 체결부에 인장하중을 부여하기 용이하도록 치공구를 제작하였다. 초소형 나사(외경 1.0 mm 내외)의 인장시험은 크기의 제약으로 인해 어려움이 따르기 때문에 본 연구에서는 실험장치 제작이 용이한 소형 나사(M4.0 나사)를 대상으로 인장시험을 진행하였다. 소형 나사는 외경 4.0 mm, 길이 20 mm, 피치 0.7 mm로 소재는 SUSXM7이다. Fig. 1(a)에 나사의 체결력 평가시험을 도시하였다. 체결부는 서로 마주보는 형태의 ‘ㄱ’자 치공구(소재: Al6063)를 제작하여 암나사



(a) Experimental setup



(b) Screw threads after separation

Fig. 1 Experiments for clamping force evaluation

를 형성하여 제작하였다.

체결력 평가시험은 체결부의 윗부분과 아랫부분을 각각 고정하고 길이방향으로 인장하중을 부여하여 진행하였다. 이때 체결부의 분리가 발생할 때까지 인장하중을 서서히 증가시켰으며, 하중이 444.8 kgf일 때 분리가 발생함을 확인하였다. Fig. 1(b)에 체결부 분리 후의 나사산 형상을 도시하였다. 결과를 보면 수나사의 나사산이 온전한 상태로 남아있어 수나사에서는 소성변형이나 파손이 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 상기 결과로부터 암나사의 나사산에서 소성변형이 발생하면서 체결부가 분리되었음을 알 수 있다.

### 2.2 소형 나사 체결력 시험과정 유한요소해석

#### 2.2.1 초기하중 개요

나사를 체결하기 위하여 조임토크(Tightening torque)를 부여하면 수나사에서는 인장력을, 암나사에서는 압축력을 받게 된다.<sup>8</sup> 이와 같이 체결시 초기에 적용되는 힘을 초기하중(Preload)이라 한다.

조임토크에 의한 축하중은 다음의 식(1)과 같이 표현된다.<sup>9</sup>

$$T = \frac{Q}{2} d_p \tan(\beta + \rho) + \mu_n d_n \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 조임토크,  $Q$ 는 축력 형태의 초기하중,  $d_p$ 와  $d_n$ 는 각각 수나사와 암나사의 직경,  $\beta$ 는 나사산 리드각을 의미한다.  $\rho$ 는 마찰각으로 식(2)와 같이 표현된다.

$$\rho = \tan \mu_p \quad (2)$$

여기서  $\mu_p$ ,  $\mu_n$ 는 각각 수나사와 암나사에서 마찰계수를 의미한다. 나사는 체결토크 값에 따라 체결력 또한 변하게 되며, 체결에 필요한 조임토크는 표준나사의 규격표를 참조하였다.<sup>10</sup> 본 연구에서는 M4.0 규격나사에 해당하는 조임토크 7.6 kgf·cm를 적용하였으며, 이를 식(1), (2)에 대입하여 초기하중을 139.83 kgf로 산출하였다.

**2.2.2 체결력 시험과정의 유한요소해석**

2.1절에 기술한 체결력 평가시험을 모사하기 위한 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석은 ABAQUS Standard<sup>®</sup>를 사용하여 수행하였다. 해석은 2차원 축대칭으로 단순화하여 정적해석을 진행하였다. 인장시험과 유사한 경계조건을 부여하기 위하여 치공구간의 접촉면에 인장하중을 부여하였다. 암나사부의 외곽면은 반경 방향으로 고정하였고, 아래쪽 암나사의 아랫면은 축방향으로 고정하였다. 유한요소해석은 2단계로 구분하여 진행하였다. 1단계에서는 초기하중을 수나사의 머리부 하단에 적용하여 유한요소해석을 진행하였다. 2단계에서는 암나사부 경계면에 인장력의 크기를 변화시켜가며 (100, 200, 300, 444.8 kgf) 유한요소해석을 진행하였다.

모든 경우에 수나사와 암나사간의 경계면에서는 변형체-변형체 접촉조건을 부여하였으며, 나사산의 마찰계수는 관련 문헌을 참조하여 0.1로 적용하였다.<sup>11,12</sup> Table 1에 사용된 소재의 물성을 요약하였다. 2가지 소재 모두 탄소성 영역에서의 변형거동을 고려한 해석을 수행하였으며, Fig. 2에 해석시 사용한 2가지 소재에 대한 응력-변형률 곡선을 도시하였다.

Fig. 3에 임계하중인 444.8 kgf를 적용하였을 경우의 응력분포를 도시하였으며, 초기하중만 적용한 1단계 해석결과와 임계 인장하중을 추가로 적

Table 1 Material property of SUSXM7 and Al6063

Material	SUSXM7	Al6063
Density (kg/m3)	8000	2700
Young's modulus (GPa)	193	68.9
Yield strength (MPa)	680	89.6
Tensile strength (MPa)	860	172
Poisson's ratio	0.25	0.33

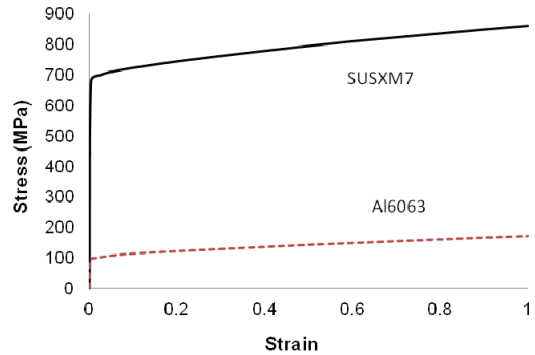


Fig. 2 Stress strain curves of two materials

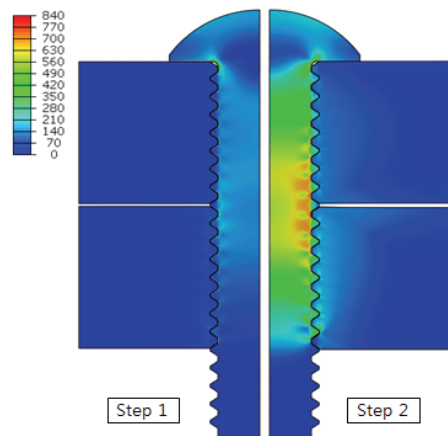


Fig. 3 Effective stress distribution of entire analysis domain at 444.8 kgf (unit: MPa)

용한 2단계 해석결과를 함께 도시하였다. 수나사에서는 끝부분에서 최대응력이 발생하였으며, 최대응력은 734.4 MPa로 예측되었다. 암나사는 나사산부에서 최대응력이 발생되었으며, 최대응력은 279.9 MPa로 나타나 암나사와 수나사 모두 항복응력을 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 4(a)에 암나사부의 응력분포를 별도의 응력범위에 대해 도시하였으며, 이때 항복응력을 초과하여 소성영역에 들어간 영역을 별도로 구분(검은

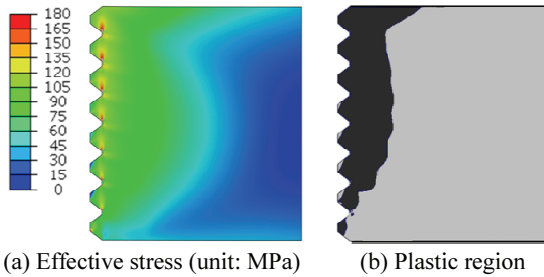


Fig. 4 FE analysis results for the negative screw part

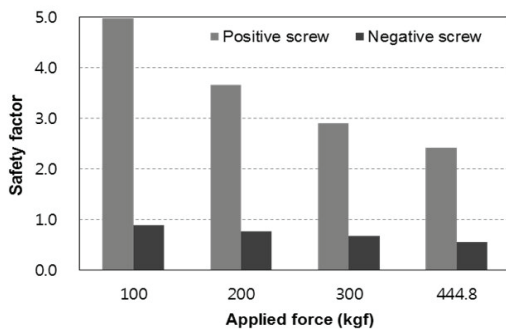


Fig. 5 Comparison the safety factor for each condition

색 표시)하여 Fig. 4(b)에 도시하였다. 결과를 보면 나사산부가 전반적으로 소성영역에 진입했음을 알 수 있으며, 결과적으로 나사부 전체에서 소성변형이 발생하여 나사산이 뭉개지면서 분리가 발생한 것으로 예측된다.

하중 변화에 따른 나사산의 안전성 여부를 판단하기 위해 응력이 가장 높게 나타나는 첫 번째 나사산에서 안전계수를 산출하였다. 해석 결과로부터 수나사와 암나사 접촉부에서의 평균응력을 산출하고, 계산된 응력과 재료의 항복응력과의 비를 기준으로 안전계수를 계산해주었다. Fig. 5에 각각의 하중에 대한 수나사와 암나사의 안전계수를 그래프로 비교하였다. 모든 하중 값에서 수나사의 안전계수는 2.0 이상으로 산출되어 안전한 것으로 판정되었으나, 암나사의 안전계수는 1.0 이하로 산출되어 소성변형이 발생함을 확인하였다. 상기 결과로부터 암나사부의 응력이 상대적으로 낮음에도 불구하고 먼저 파손이 발생하는 현상이 설명될 수 있다. 한편 임계하중(444.8 kgf)에서의 암나사의 안전계수는 0.55로 예측되었는데, 이는 소성변형이 나사산 전체영역에 진전되어 체결부 분리가 발생하는 시점까지의 임계 안전계수 값으로 설정할 수 있다.

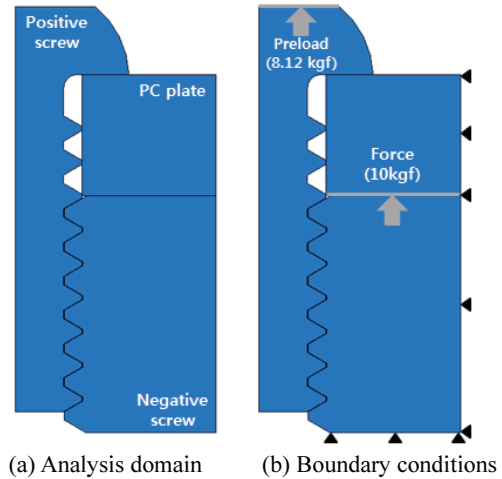


Fig. 6 Analysis domain and boundary condition for FE analysis of the subminiature screw

### 3. 초소형 나사의 체결력 유한요소해석

#### 3.1 초소형 나사 체결력 시험 전산모사

2.2절의 결과를 바탕으로 초소형 나사(M1.0)에 대한 유한요소해석을 진행하였다. 초소형 나사의 외경, 피치와 길이는 각각 1.0 mm, 0.25 mm, 3.0 mm 이다. Fig. 6(a)에 체결력 평가를 위한 유한요소해석 모델을 도시하였다. 해석모델은 소형 전자기기에서의 체결특성을 고려하여 황동 너트에 플라스틱 기관이 체결된 형태로 구성하였다. 이때 수나사의 소재는 SUSXM7, 기관의 소재는 폴리카보네이트 (Polycarbonate; PC)를 적용하였으며, Table 2에 해석에 적용한 소재의 물성을 요약하였다.

Fig. 6(b)에 해석을 위한 경계조건을 도시하였다. 너트부가 전자기기 몸체에 인서트 사출로 삽입된 상태를 가정하여 너트의 외곽면을 반경방향으로, 아랫면을 축방향으로 고정하였다. 또한 초기하중을 고려하기 위해 2.2절과 마찬가지로 2단계로 구분하여 해석을 진행하였다. 1단계 해석에서는 조임 토크 0.1 kgf·cm 를 식(1)에 대입하여 계산된 8.12 kgf 의 초기 인장하중을 부여하였다. 2단계에서는 기관의 하단에 10 kgf의 인장력을 적용하여 해석을 진행하였다. 이때 나사산 접촉면의 마찰계수는 0.1 을 적용하였다.

Fig. 7에 유한요소해석을 통해 예측된 전체 해석 영역에서의 응력분포를 도시하였으며, Fig. 8에 너트부의 응력분포를 도시하였다. 각각의 경우 초기하중만 적용한 1단계와 인장하중을 추가로 부여

Table 2 Comparison of material properties

Material	SUSXM7	Brass	PC
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800	8530	1200
Young's modulus (GPa)	193	110	2.3
Yield strength (MPa)	680	112	62
Tensile strength (MPa)	860	580	65
Poisson's ratio	0.25	0.375	0.38

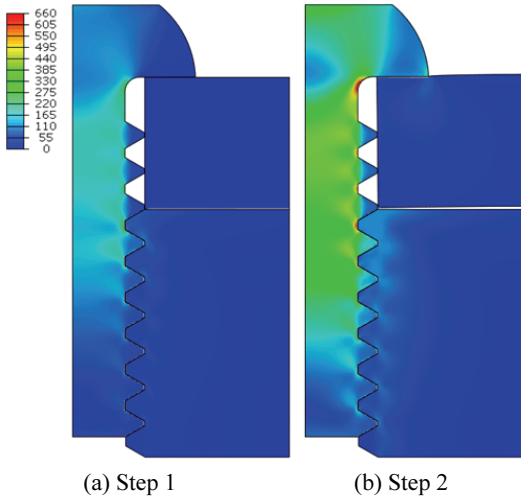


Fig. 7 Stress distributions for the entire region (unit: MPa)

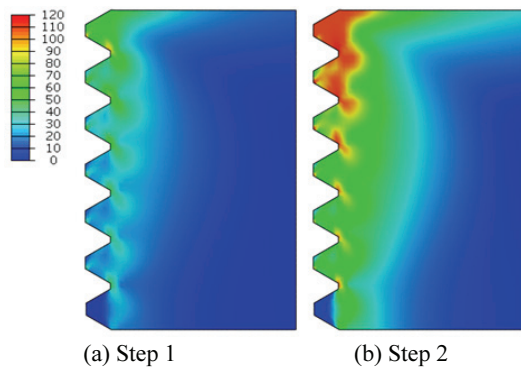


Fig. 8 Stress distributions for the nut region (unit: MPa)

한 2단계로 구분하여 도시하였다. 2단계의 결과를 보면 수나사의 경우에는 머리부 하단 코너부와 나사골 부분에서 최대응력이 발생하였으며, 최대응력은 680.5 MPa 로 나타나 항복응력을 약간 상회하는 것으로 나타났다. 암나사에서는 상부 나사산에서 최대응력이 발생하였으며, 최대응력은 118.3 MPa로 나타나 역시 항복응력을 초과함을 알 수

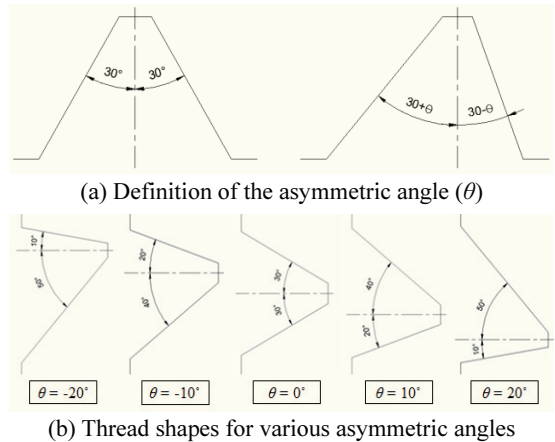


Fig. 9 Thread shape designs of the positive screw

있다. 한편 체결부 분리에 직접적으로 영향을 미치는 나사산 접촉부의 평균응력으로 안전계수를 산출한 결과 수나사에서는 2.91, 암나사에서는 1.03의 값이 예측되어 역시 암나사부의 안전계수가 낮게 나와 하중 증가시 소성변형이 발생하여 먼저 파손이 발생할 것으로 예측되었다.

### 3.2 비대칭 나사산에 대한 체결력 비교

본 연구에서는 초소형 나사의 체결력을 높이기 위하여 기존의 나사산과는 다른 비대칭 나사산 설계를 진행하였다. 일반적으로 사용되고 있는 나사의 경우 나사산의 각도는 60°이며 중심축을 기준으로 좌우가 30°로 대칭형 형태를 이루고 있다. 본 연구에서는 이러한 대칭 나사산에 비대칭성을 부여하여 체결시 접촉면적을 변화시킴으로써 체결력을 증가시키기 위한 설계변경을 시도하였다. 즉 Fig. 9(a)와 같이 편심각(θ)을 부과하여 중심축을 기준으로 접촉면적의 변화가 생기도록 하였다. 편심각에 따른 나사산부의 응력 변화를 고찰하기 위해 Fig. 9(b)와 같이 편심각 크기를 -20°~20°까지 10°씩 변경하여 비대칭 나사산 형상을 설계하였다.

5가지 나사산 형상에 대하여 3.1절과 동일한 경계조건을 부여하여 유한요소해석을 진행하였다. Fig. 10(a)와 (b)에 각각 편심각이 -20와 20° 일 때의 응력분포를 도시하였다. 수나사의 경우 편심각 -20°에서 최대응력이 680.4 MPa로 예측되어 표준나사의 경우(680.5 MPa)보다 약간 감소된 반면, 편심각 20°에서의 최대응력은 681.3 MPa로 약간 증가함을 알 수 있다. 반면 안전계수의 기준이 되는 나사산 접촉부의 경우 편심각 -20°에서 272.2 MPa로



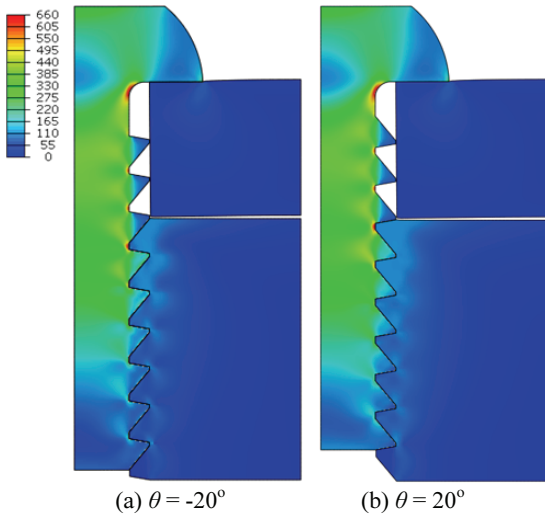


Fig. 10 Stress distributions for the entire region (unit: MPa)

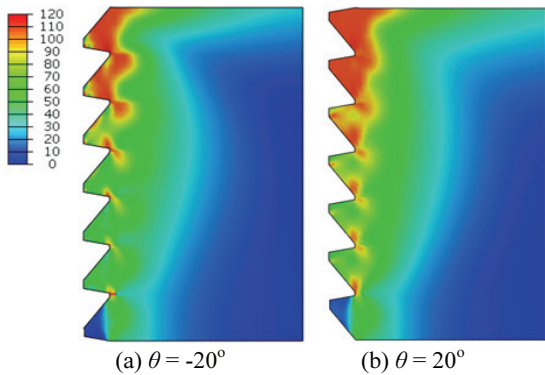


Fig. 11 Stress distributions for the nut region (unit: MPa)

예측되어 표준나사의 경우(233.4 MPa)보다 16.6% 증가한 반면, 편심각 20°에서는 214.2 MPa로 나타나 8.2% 정도 감소하였다. 상기 결과로부터 수나사의 경우는 양의 편심각을 부여하였을 경우 나사산에서의 응력이 완화됨을 알 수 있다.

Fig. 11에 각각의 경우에 대해 암나사의 응력분포를 분리하여 도시하였다. 암나사의 경우 편심각이 -20°인 경우가 편심각이 20°인 경우에 비하여 나사산에서의 응력분포가 전반적으로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 암나사의 최대응력은 편심각 -20°에서 117.18 MPa로 예측되어 표준나사의 경우(118.3 MPa)보다 약간 감소된 반면, 편심각 20°에서는 118.7 MPa로 예측되어 약간 증가함을 알 수 있다. 반면 안전계수의 기준이 되는 나사산 접촉

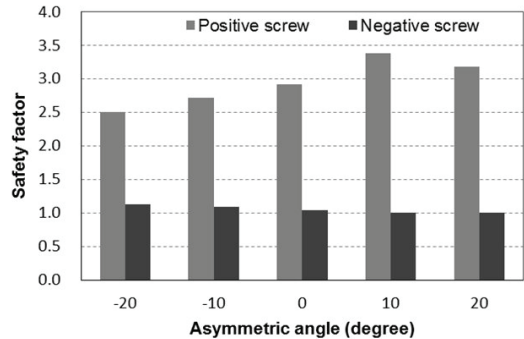


Fig. 12 Comparison the safety factor with a variation in the asymmetric angle ( $\theta$ )

부의 경우 편심각 -20°에서 99.4 MPa로 예측되어 표준나사의 경우(107.8 MPa)보다 7.8% 감소한 반면, 편심각 20°에서는 111.7 MPa로 나타나 3.5% 정도 증가하였다. 상기 결과로부터 암나사의 경우는 음의 편심각을 부여하였을 경우 나사산에서의 응력이 완화되는 경향을 보여 수나사의 경우와 상반됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 편심각에 따른 나사산 형상에 대하여 안전계수를 비교한 그래프이다. 총 5가지 형태의 나사산에 대하여 안전계수를 비교한 결과 수나사의 경우 양의 편심각으로 설계하였을 때 안전계수가 상승하는 반면 암나사의 경우는 음의 편심각으로 설계하였을 경우 안전계수가 상승함을 확인할 수 있다. 정량적으로 살펴보면 수나사는 모든 나사산 형상에 대하여 안전계수의 값이 2이상으로 산출되었으며, 암나사는 1내외의 안전계수가 산출되었다. 이러한 결과는 앞절에서의 결과와 마찬가지로 암나사에서 먼저 소성변형이 일어남을 의미한다. 따라서 초소형 나사의 체결력 향상을 위해서는 암나사부의 안전계수를 높이는 방향으로 나사산을 설계해주어야 한다. 이러한 기준에서 볼 때 편심각이 -20°일 때 암나사에서의 안전계수가 1.13으로 가장 높게 나타났고, 이는 편심각이 없는 표준나사의 안전계수(1.04) 대비 8.7% 증가한 값에 해당하여 체결력 향상 측면에서 가장 우수한 설계안으로 결론지을 수 있다.

### 3.3 비대칭 나사산 체결력의 실험적 검증

앞절에서 기술한 최적의 설계안을 토대로 -20°의 편심각이 부여된 비대칭 나사산을 가진 초소형 나사를 제작하였다. Fig. 13에 제작된 비대칭 나사



Fig. 13 Fabrication of an asymmetric screw (asymmetric angles:  $-20^\circ$ )

의 형상을 도시하였다. 제작된 비대칭 나사를 사용하여 체결토크를 측정된 결과  $0.771 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$  로 측정되어 기존 대칭 나사를 적용한 경우의 체결토크( $0.692 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ) 대비 11.4% 정도 향상된 결과를 보였다. 이는 해석결과로부터 얻어진 안전계수 상승비율(8.7%)과 유사한 점을 알 수 있으며, 결과적으로 제안된 비대칭 나사산을 적용하여 초소형 나사의 체결특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초소형 나사의 체결력 평가를 위한 유한요소해석을 진행하였고, 체결력 향상을 위한 나사산 각도변화의 영향을 고찰하였다. 상기 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 초소형 나사의 체결시험이 용이하지 않은 점을 감안하여 소형 나사(M4.0)에 대하여 체결력 평가시험을 진행하였다. A16063 치공구에 체결된 나사에 인장력을 부여한 결과  $444.8 \text{ kgf}$ 의 하중에서 암나사 나사산부의 소성변형에 의하여 체결부가 분리됨을 확인하였다.
- (2) 유한요소해석을 사용하여 소형 나사의 체결력 평가시험 과정을 분석하였다. 해석결과로부터 암나사의 안전계수가 수나사의 안전계수보다 낮게 나타남을 확인하였으며, 임계하중인  $444.8 \text{ kgf}$ 에서의 안전계수가 0.55로 나타남을 확인하였다.
- (3) 상기 결과를 바탕으로 초소형 나사(M1.0)가 황동너트에 조립된 상태의 조립체에 대한 체결력 해석을 진행하였으며, 소형 나사와 유사하게 암나사부의 안전계수(1.03)가 수나사의 안전계수(2.91)보다 낮게 나오는 점을 확인하였다.
- (4) 초소형 나사의 체결력 향상을 위해 수나사/암나사간의 안전계수 편차를 감소시킬 수 있도록 비대칭 나사산의 설계를 제안하였다. 다양한

각도의 비대칭 나사산에 대해 유한요소해석을 실시한 결과 편심각이  $-20^\circ$ 인 경우가 암나사의 안전계수가 1.13으로 8.7%의 상승을 보여 체결력 향상 측면에서 가장 우수한 설계안임을 확인하였다.

- (5) 편심각  $-20^\circ$ 를 적용하여 비대칭 나사산을 가진 초소형 나사를 제작하였고, 체결토크를 측정된 결과 기존의 표준나사 대비 11.4% 향상된 결과를 보임을 확인하였다.

상기 연구결과를 통해 나사산의 편심각 부여가 초소형 나사의 체결력을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 본 연구결과를 산업현장에 적용하여 비대칭 나사산을 가진 초소형 나사산을 개발할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업(우수기술연구센터사업)으로 지원된 연구임(과제번호: 10045724).

#### REFERENCES

1. Kim, J.-B., Seo W.-S., and Park, K., "Damage Prediction in the Multistep Forging Process of Subminiature Screws," *Int. J. Precis. Engng. Manuf.*, Vol. 13, No. 9, pp. 1619-1624, 2012.
2. Yan, Y., Wen, W.-D., Chang, F.-K., and Shyprykevich, P., "Experimental Study on Clamping Effects on the Tensile Strength of Composite Plates with a Bolt-Filled Hole," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, No. 10, pp. 1215-1229, 1999.
3. Drean, M., Habraken, A.-M., Bouchair, A., and Muzeau, J.-P., "Swaged Bolts: Modelling of the Installation Process and Numerical Analysis of the Mechanical Behavior," *Computer & Structure*, Vol. 80, No. 27-30, pp. 2361-2373, 2002.
4. Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A., and Sakai, S., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tightening and Loosening Mechanism of Threaded Fastener," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No. 4, pp. 604-615, 2005.
5. Crococolo, D., Agostinis, M. D., and Vincenzi, N.,

- “Failure Analysis of Bolted Joints: Effect of Friction Coefficients in Torque-Preloading Relationship,” *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, No. 1, pp. 364-373, 2011.
6. Han, J. W., Kim, J. H., and Park, Y. S., “Evaluation of Structural Performance and Improvement of Screw Thread Shape on 1,300 MPa High Strength Bolts,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 3A, pp. 189-198, 2011.
  7. Hwang, H.-Y., “Bolted Joint Torque Setting using Numerical Simulation and Experiments,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 5, pp. 1361-1371, 2013.
  8. Kim, K. K., “A Study for Structural Characteristics of Tower Flange Connection under the Bolt Pretension in Offshore Wind Turbine System,” M.Sc. Thesis, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University, 2011.
  9. Koo, S.-H., Cho, W.-M., and Lee, B.-E., “Structural Analysis for Thread Joint Part of Rocket Motor Case Applied Pre-Load,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 144-149, 2007.
  10. Tohnichi Co., “Torque Technical Data,” <http://www.tohnichi.com/torque-technical-data.asp> (Accessed 22 August 2014)
  11. Toshiyuki, S. and Yasumasa, S., “Analytical Research on Mechanism of Bolt Loosening Due to Lateral Loads,” *Proc. of ASME on Pressure Vessels and Piping*, Vol. 2, No. PVP2005-71333, pp. 59-65, 2005.
  12. Toshiyuki, S., Mitsutoshi, I., and Hiroshi Y., “Experimental Evaluation of Screw Thread Loosening in Bolted Joint with Some Parts for Preventing the Loosening under Transverse Repeated Loadings,” *Proc. of ASME on Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11*, Vol. 2, No. PVP2006-ICPVT-11-93292, pp. 211-220, 2006.