

◆ 특집 ◆ 초소형 체결부품의 설계 및 생산기술

## 조임 및 풀림 해석을 이용한 나사산 형상 설계

### Thread Shape Design Using Joining and Release Analysis of Bolts

정진환<sup>1</sup>, 이현규<sup>1</sup>, 김종봉<sup>2,✉</sup>, 박근<sup>3</sup>  
Jin Hwan Jeong<sup>1</sup>, Hyun-Kyu Lee<sup>1</sup>, Jong-Bong Kim<sup>2,✉</sup>, and Keun Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

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

<sup>3</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: jbkim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6434

Manuscript received: 2015.5.11. / Revised: 2015.5.22. / Accepted: 2015.5.26.

*As the sizes of mobile phones and watch phones decrease, the joining bolt for the products should also be decreased to a miniature size. However, the miniature-sized bolt has to support sufficient joining and anti-releasing torque to keep the product fastened. In this study, the thread shapes are designed to improve anti-releasing performance of bolts. Especially, when bolt materials is stronger than nut materials, the design of thread shapes is needed, like bolt for wood, to improve the fastening capability. Through the joining and releasing analyses of bolts, the thread shapes for SUS302 bolt and Mg alloy nut are newly designed. It was shown that the newly designed bolt has 20 % higher anti-releasing torque and 35% lower torque loosening slope compared to the standard bolt.*

KEYWORDS: Joining analysis (체결 해석), Releasing analysis (풀림 해석), Thread design (나사산 설계)

#### 기호설명

$Q$  : Bolt joining force

$T$  : Bolt joining and releasing torque

$d_T$  : Average thread diameter

$d_C$  : Average collar diameter

$\alpha$  : Thread angle

$\beta$  : Lead angle of thread

$\rho'$  : Equivalent friction angle of thread

$\mu_C$  : Friction coefficient of collar

#### 1. 서론

볼트는 대표적인 체결용 기계 요소부품이다. 체결력이 강하고 유지보수에 편리하기 때문에 볼트는 대형 구조물부터 초소형 전자기기까지 광범위하게 사용된다. 기술의 발달로 전자기기의 소형화 및 경량화가 급속히 진행되고 있다. 최근에는 휴대폰의 두께가 얇아지고, 웨어러블 기기가 각광받으면서 제품에 사용되는 부품에 대한 높은 제작 기술이 요구된다. 또한, 소형화 기기 및 웨어러블

기기에 사용되는 볼트 및 체결부품 또한 소형화 및 부품 개수의 감소가 크게 요구되고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위해, 본 연구에서는 휴대폰 및 웨어러블 기기에 사용되는 초소형 볼트의 체결 및 풀림 토크 개선에 대해 연구를 수행하였다. 볼트에 작용하는 토크는 볼트의 체결력, 나사산 사이의 마찰력, 그리고 볼트머리밀면과 나사 면에 작용하는 마찰력에 의해 발생한다.<sup>1</sup> 볼트의 크기가 소형화 되면 그만큼 각 체결 부의 접촉면적과 체결되는 나사산의 개수가 줄어들어 체결력 및 마찰력이 감소하게 된다. 소형화 된 볼트의 토크를 유지 및 강화시킬 수 있는 나사의 형태, 크기의 최적화가 필요하다.

볼트의 체결력을 향상시키기 위해 일반적으로 와셔(Washer) 또는 접착제 등이 사용되고 있다.<sup>2</sup> Kim 등<sup>3,4</sup>은 볼트의 직경과 길이에 따라 변화하는 체결력에 대하여 연구하였다. Khashaba 등<sup>5</sup>은 와셔의 크기가 체결토크에 미치는 영향을 연구하였고, Han 등<sup>6</sup>은 고장력 볼트의 개선을 위해 나사의 치수를 변화시키고 유한요소해석을 통해 응력분포를 분석하였다. 최근에는 높은 체결력을 위한 최적의 조임토크 설정에 대한 연구도 수행되었다.<sup>7</sup> 이 밖에도 Min 등<sup>8</sup>과 Lee 등<sup>9</sup>은 초소형 볼트의 나사산의 각도와 비트의 깊이가 볼트의 체결 토크에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Bhattacharya 등<sup>10</sup>은 진동을 받는 구조물에서 볼트의 체결력 약화를 여러 가지 형태의 볼트에 대해 실험을 통해 비교 분석하였고, Pai와 Hess<sup>11</sup>는 진동이 가해지는 구조물에서 볼트의 체결력이 약화되는 현상을 유한요소해석으로 분석하였다.

볼트에 대한 연구는 대부분 체결력 관점에서 수행되어 왔고,<sup>3-9</sup> 풀림 관점에서는 진동을 받는 구조물에 대한 연구<sup>10,11</sup> 또는 와셔나 접착제를 사용하는 관점에서 연구가<sup>2</sup> 수행되었다. 그리고, 볼트 자체에 대한 연구도 중요하지만, 목재용 볼트와 같이 너트와 같은 피체결체의 강도를 고려한 볼트의 설계도 중요하다. 휴대폰에서 사용되는 볼트의 경우 볼트가 마그네슘, 알루미늄, 또는 플라스틱 패널과 같이 약한 재료에 조립이 되는 경우가 많다. 그렇기 때문에 피체결체의 강도를 고려한 볼트의 설계가 필요하다.

본 연구에서는 SUS 볼트와 Mg 합금 너트의 경우에 대해 볼트의 나사산 형상에 따른 체결 및 풀림 토크를 해석하였다. SUS 소재가 Mg 합금소재보다 강한 재료이기 때문에 볼트의 나사산 폭이

너트 보다 작아도 된다. 두 재료의 파괴 강도를 고려하여 풀림 토크와 풀림 토크 기울기 관점에서 볼트 나사산의 최적 형상을 찾고자 하였다.

## 2. 볼트 조임 및 풀림 토크 해석

### 2.1 나사 체결 기초 이론

본 연구에서는 결합용 기계요소인 미터 보통나사를 이용하여 연구를 진행하였다. 미터 나사는 표준적으로 가장 많이 쓰인다. 미터 나사의 하나인 삼각나사는 나사 면의 마찰과 나사를 조이는데 필요한 너트와 와셔 간의 마찰을 고려하여 설계된다. 나사를 체결하기 위하여 조임토크를 부여하면 수나사(볼트)에서는 인장력을, 암나사(너트)에서는 압축력을 받게 된다.<sup>12</sup> Fig. 1은 미터 보통나사(삼각나사)에 작용하는 수직력을 나타낸다.

Fig. 1의 축력( $Q$ )과 마찰에 의한 조임 및 풀림 토크는 식(1)과 (2)에 의해 각각 계산된다.

$$T_j = Q \cdot \left\{ \frac{d_r}{2} \cdot \tan(\rho' + \beta) + \mu_c \frac{d_c}{2} \right\} \quad (1)$$

$$T_r = Q \cdot \left\{ \frac{d_r}{2} \cdot \tan(\rho' - \beta) + \mu_c \frac{d_c}{2} \right\} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서  $Q$ 는 축력,  $d_r$ 와  $d_c$ 는 각각 나사산과 볼트 머리부 (Collar) 평균지름,  $\beta$  는 리드각,

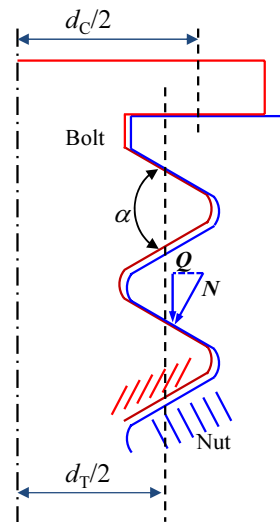


Fig. 1 Schematic illustration of thread geometry and joining force

$\rho$ 은 삼각나사의 등가 마찰각,  $\mu_c$ 는 머리부 마찰계수이다. 일반적으로 체결 토크를 결정하는 주 인자는 볼트의 직경과 축력 나사산의 각도이다. 이 계산식은 볼트와 너트를 강체로 보고 유도된 식이고, 실제로는 나사산이 변형도 되고 나사산 부분의 파손도 고려해야 하기 때문에 유한요소 해석을 통해 연구를 수행하였다. 볼트의 나사산 유효 직경과 나사산 각도(폭)를 변수로 하여 9가지의 나사산 형상에 대한 볼트의 체결 토크를 해석하였다.

### 2.2 해석방법 및 모델링

Fig. 2는 해석모델을 보여준다. M1.0 미터 보통나사를 기준으로 나사산의 높이(H)와 폭(L)을 변수로 하여 총 9가지의 모델에 대한 해석을 진행하였다. 해석은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS<sup>13</sup>를 사용하였다. 재료가 다른 볼트와 너트를 조립한 상태에서 너트의 아랫면의 변위를 고정하였다. 체결비트는 강체로 모델링 하였고 비트에 회전 변위를 가해 해석을 진행하였다. 볼트와 너트가 접촉된 상태에서 볼트를 추가로 회전하여 조임을 해석하고 난 후 풀림을 해석하였다. 볼트는 SUS302 이고, 너트는 Mg 합금소재이다. Table 1에 재료 물성을 보였다.

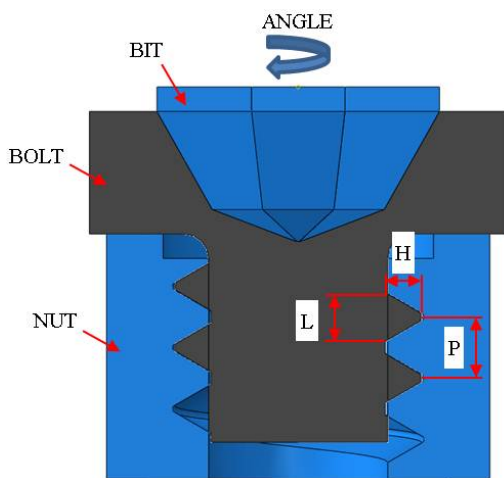


Fig. 2 Model description for analysis

Table 1 Material properties of bolt and nut

Material	Young's modulus	Tensile strength	Yield stress	Poisson ratio
SUS302	200GPa	930MPa	766MPa	0.3
Mg alloy	45GPa	300MPa	180MPa	0.35

Fig. 3은 M1.0미터 보통나사의 표준 규격 모델을 기준으로 나사산 높이(H)와 폭(L)과 피치(P)의 비율(H/P, L/P) 변경하여 9가지의 모델을 모델링 하였다. Fig. 3(a)는 나사산 높이 별 모델링을 나타낸다. Fig. 3(b)는 나사산 폭에 따른 모델링을 나타낸다. Fig. 4는 너트 부 모델의 형상과 요소를 나타내고 A, B는 응력이 집중되는 위험부위를 나타낸 모습이다. 사전 해석을 통해 요소의 크기를 충분히 작게 설정하였고 사면체 요소로 하여 접촉부위와 위험부위를 더욱 작게 요소를 구성하였다. 또한, 사전 해석을 통해 너트 부의 응력이 집중되는 두 곳 (A, B)을 위험부위로 선정했다. 볼트와 너트의 재료가 다른 만큼 각 재료의 항복응력 및 인장응력을 고려하여 유효응력과 항복응력의 차이가 인장강도와 항복강도 차이의 약 70%에 도달할 때까지 각 모델의 최대 조임 토크를 예측하였고, 이후 풀림 해석을 수행하여 풀림 토크 예측하였다.

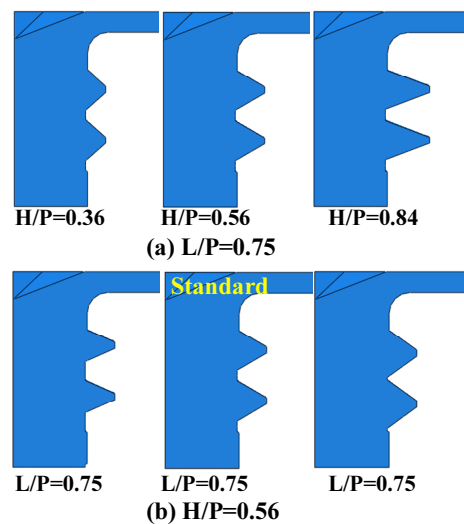


Fig. 3 Thread shapes for various thread height and width

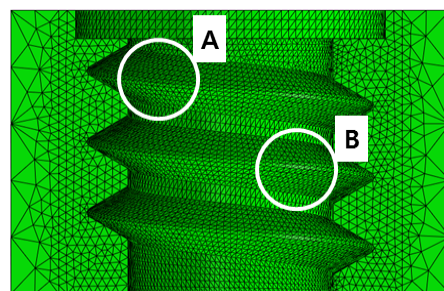


Fig. 4 Finite element model for nut

### 3. 해석결과

Fig. 5는 L/P가 0.6인 경우 나사산 높이에 따른 너트와 볼트의 조임 상태에서의 응력분포를 보여 준다. 모든 경우에서 위험부위로 예상된 A, B 부분 (Fig. 4)에서 최대응력이 발생했다. 사진 해석을 통

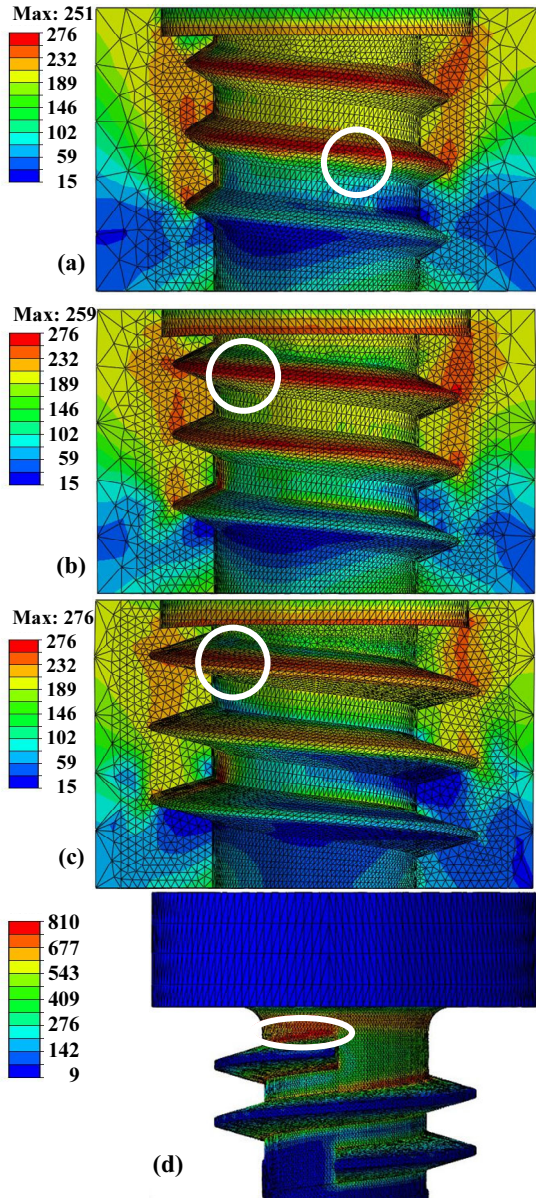


Fig. 5 Von-mises stress distribution of nut for (a) H/P=0.36, (b) H/P=0.56, (c) H/P=0.84, and (d) Bolt for H/P=0.84 (L/P=0.6)

해 너트 부 최대응력이 260 MPa이 되는 볼트 조임 각도를 설정했지만 약간의 차이를 보이고 있다. 순간적으로 응력이 증가하는 구간이라 차이를 보이고 있지만, Fig. 6에 보인 토크 곡선에서 알 수 있듯이 토크 증가 기울기가 완만하기 때문에 토크에 미치는 영향은 크지 않다. 너트 부위는 (유효응력-항복응력)/(인장강도-항복응력) 값이 약 0.7에 도달하였지만, 볼트의 응력은 그 값이 약 0.3으로 안전함을 알 수 있다. 이것은 Mg 합금인 너트가 먼저 파손이 됨을 알 수 있다. 너트의 상부 측은 모두 소성영역으로 돌입했고 하부 측만 탄성으로 남아있음을 확인 할 수 있다. 세 가지 경우에서 볼트 부의 최대 Von-mises 응력이 약 810MPa로 볼트 역시 소성영역에 들어선 것을 확인 할 수 있다. 이것으로 볼트의 체결이 충분히 수행된 것으로 보인다. 해석은 임계(최대) 체결 토크를 예측하기 위해 큰 각도로 볼트를 체결하였지만, 실제 적용과정에서는 보다 안전한 영역에서의 체결이 되도록 체결 각도 또는 체결 토크를 선정하는 것이 필요하다. Fig. 5의 응력분포에서 너트는 나사산 골 부분의 응력이 가장 크기 때문에 골 부분에서 인장

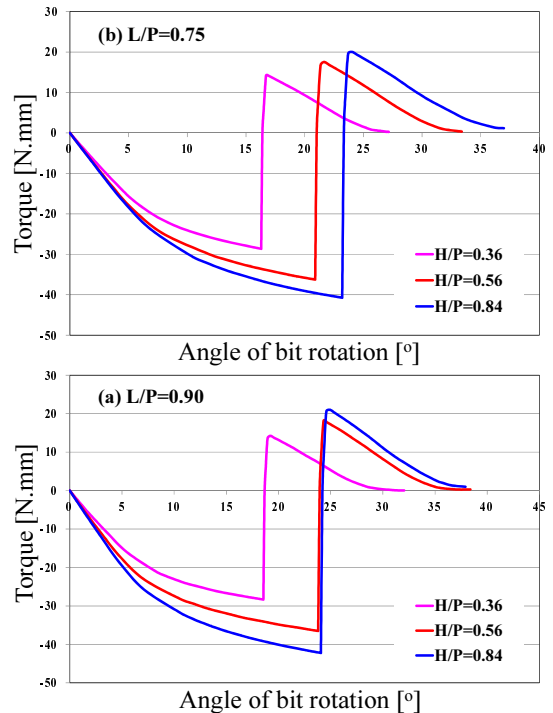


Fig. 6 Joining and releasing torque for various values of H/P and L/P

에 의한 파손이 예측되고, 볼트는 머리 목부에서 응력이 가장 크고 나사산에서는 역시 끝 부분이 큰 응력을 보인다. 목 부에서는 조임에 의한 전단과 축력에 의한 인장응력이 영향을 미친 것을 알 수 있고, 끝 부분에서는 체결에 의한 굽힘 또는 전단에 의해 파손이 예측된다. 또한 볼트 나사 끝에서는 머리 쪽으로 갈수록 응력이 크고, 반대쪽으로 갈수록 응력이 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 여러 가지 L/P 값과 H/P값에 대해 회전 각도에 따른 조임 및 풀림 토크를 나타낸 그래프이다. 토크 값이 음수인 구간이 조임 과정이고, 양수인 구간이 풀림 과정이다. H/P 값이 커질수록 더 큰 각도로 체결했을 때 설정한 임계응력 값에 도달하기 때문에 더 큰 조임 각이 설정되었다. 또한 H/P값이 커질수록 조임 및 풀림 토크가 커짐을

알 수 있다. 그리고, L/P 값이 증가할수록 모델 전체적으로 최대 조임 및 풀림 토크가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. L/P 값이 고정되었을 경우에는 나사산의 높이 비 H/P가 클수록 최대 조임 및 풀림 토크가 증가한다. 나사산의 높이가 높으면 식(1)에서  $d_f$  값이 증가하게 되므로 최종 토크 값이 증가하는 것으로 사료된다.

본 연구에서 중요한 관점으로 보고 있는 최대 풀림 토크와 풀림 토크가 줄어드는 기울기를 Fig. 6의 결과에서 구하여 Fig. 7에 등고선도로 도시하였다. 풀림 토크가 줄어드는 기울기는 볼트 체결 후 외부 충격이나 진동 등에 의해서 나사가 풀리기 시작할 때 풀림에 대한 특성으로 중요하다고 판단되기 때문이다. 이 기울기를 작게 하기 위해 스프링 와셔 등을 사용하기도 하지만, 공간 등의 여유로 초소형 볼트에서는 사용이 어렵기 때문에 볼트 자체가 그런 특징을 가지게 설계할 필요가 있다. 그렇기 때문에 볼트가 풀리는 속도 역시 볼트의 성능에 주요한 인자가 될 수 있다. Fig. 7(a)는 최대 풀림 토크에 대한 등고선도이고, Fig. (b)는 볼트 풀림 토크 기울기에 대한 등고선도이다. 삼각형으로 표시한 부분이 표준(standard) 형상이다. Fig. 7(a)에서 나사산의 폭 (L) 보다는 나사산의 높이 (H) 가 최대 풀림토크에 큰 영향을 줌을 알 수 있고, 원으로 표시된 부분이 최대임을 알 수 있다. 풀림 토크 기울기는 기준 모델이 가장 크고 사각형으로 표시된 부분이 가장 작음을 알 수 있다. 하지만, 사각형으로 표시된 부분은 최대 풀림 토크가 너무 작아서 최적이라고 볼 수 없다. 최대 풀림 토크가 가장 큰 오른쪽 상단 부분(Fig. 7(a)의 원 부분)도 기울기가 다소 작기 때문에 현재 해석 결과로는 H/P=0.84, L/P=0.90 인 경우가 최적으로 판단이 된다. 이 경우 표준 모델과 비교할 때, 최대 풀림 토크는 약 20% 증가하고, 풀림 토크 기울기는 약 35% 감소하여 성능이 우수함을 알 수 있다. 나사산 폭은 피치 (P) 보다 크게 할 수 없기 때문에, 나사산의 높이를 더 높일 수 있다면 그에 대한 추가적인 연구를 통해서 보다 최적의 형상을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

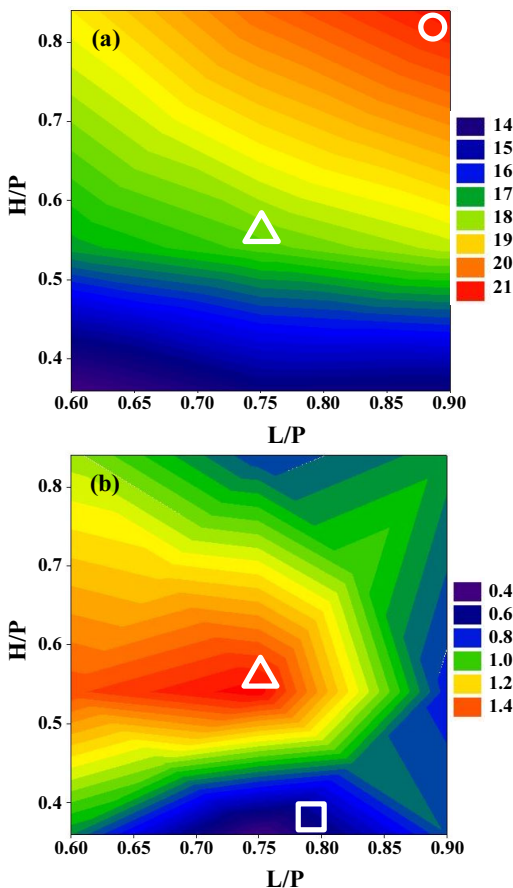


Fig. 7 Contour plot for the (a) Maximum releasing torque and (b) Decreasing slope of the releasing torque

#### 4. 결론

본 연구에서는 볼트와 너트의 재료가 다를 경우, 즉 볼트는 SUS302이고 너트는 Mg 합금인 경우 나사산의 형상이 볼트의 최대 조임 및 풀림 토크

크에 미치는 영향을 연구하였다. 표준 규격 M1.0 보통 나사를 기준으로 나사산 높이와 나사산 폭을 설계인자로 하여 유한요소 해석을 수행하여 최대 풀림 토크와 풀림 토크가 감소하는 기울기를 예측하였다. 최대 풀림 토크는 나사산의 폭과 높이가 커질수록 큼을 알 수 있었고, 풀림 토크 감소 기울기는 표준 모델이 가장 크고 나사산의 높이가 높을 수록, 그리고 폭이 클수록 작아짐을 알 수 있었다. 해석 결과를 통해서 최적의 형상을 결정하였고, 최대 풀림 토크는 20%, 풀림 토크 기울기는 약 35% 개선됨을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업기술혁신사업(우수 기술연구센터사업)으로 지원된 연구임(No.10045724).

## REFERENCES

- Jiang, Y., Chang, J., and Lee, C.-H., "An Experimental Study of the Torque-tension Relationship for Bolted Joints," *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 417-429, 2001.
- 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.
- Kim, S. S., Kim, S. Y., and Kim, K. S., "Evaluation of Clamping Forces according to Length-to-diameter Ratios and Preserved Thred Lengths of High Strength Bolts," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 12, No. 3, pp. 259-268, 2000.
- Kim, Y. H. and Kim K. S., "Evaluation of Tightening Forces according to Length-diameter Ratios for High Strength Bolts," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 15, No. 1, pp. 37-44, 1999.
- Khashaba, U., Sallam, H., Al-Shorbagy, A., and Seif, M., "Effect of Washer Size and Tightening Torque on the Performance of Bolted Joints in Composite Structures," *Composite Structures*, Vol. 73, No. 3, pp. 310-317, 2006.
- 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.
- 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.
- Min, K. B., Kim, J.-B., Park, K., and Ra, S. W., "Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws according to Thread Angle Variation," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 9 pp. 839-846, 2014.
- Lee, H.-K., Park, K., Ra, S.-W., and Kim, J.-B., "Prediction of Joining Torque for Bit Depth of Subminiature Bolt," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 38, No. 8, pp. 917-923, 2014.
- Bhattacharya, A., Sen, A., and Das, S., "An Investigation on the Anti-loosening Characteristics of Threaded Fasteners under Vibratory Conditions," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, No. 8, pp. 1215-1225, 2010.
- Pai, N. and Hess, D., "Three-dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening due to Dynamic Shear Load," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 4, pp. 383-402, 2002.
- 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.
- ABAQUS, "ABAQUS Manual, Version 6.12, Dassault Systems," 2012.