Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 41, No. 4, pp. 257~262, 2017

<학술논문> DOI https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.4.257 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

초소형 쎄레이션 볼트의 체결성능 분석

장명근* · 정진환* · 장연희* · 김희철** · 김종봉**†
* 서울과학기술대학교 자동차공학과, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Investigation of Fastening Performance of Subminiature Serrated Bolt

Myung Guen Jang*, Jin Hwan Jeong*, Yeon Hui Jang*, Hee Cheol Kim**
and Jong-Bong Kim**†
* Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech,
** Dept. of Mech. and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech.

(Received May 25, 2016 ; Revised November 8, 2016 ; Accepted December 23, 2016)

Key Words: Serration Bolt(쎄레이션 볼트), Release Torque(풀림 토크), Releasing Analysis(풀림 해석)

초록: 최근 스마트 폰, 스마트 와치 등과 같은 전자기기의 크기가 작아지면서, 그에 사용되는 체결 볼트의 크기 또한 작아지고 있다. 초소형 나사는 제품을 체결하는 데 있어 충분한 체결 토크나 풀림 방지효과를 갖지 못한다. 그래서 초소형 나사의 체결력과 풀림방지 효과를 유지 및 강화하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 초소형 나사의 풀림방지 효과를 강화하기 위해 나사의 머리 밑 면에 쎄레이션 형상을 추가하여 그 효과를 분석하였다. 쎄레이션 볼트는 풀림과정에서 피체결체 윗면을 변형시켜 풀림 방지 턱을 생성해 풀림을 방지하는 역할을 한다. 쎄레이션 개수와 체결 깊이를 변수로 하여 그 영향을 분석하고 풀림 방지 성능에 미치는 영향을 확인하였다.

Abstract: As the size of electric products such as mobile phones and smart watches decrease, the bolts used to assemble these products should also be miniaturized. A miniature-sized bolt has to provide sufficient joining torque and anti-releasing torque to keep the components together. We studied a serrated bolt as a candidate for a miniature-sized fastener to increase the anti-releasing torque. In a serrated bolt, a serrated shape is formed on the bottom surface of the bolt head to create an obstacle to releasing. In this study, finite element analyses for the joining and releasing of bolts were carried out, and the anti-releasing performance was predicted. Based on the results of analyses using various numbers of serrations and fastening depths, the effects of the number of serrations and fastening depth on the anti-releasing performance were investigated.

1. 서 론

볼트는 대형 구조물부터 소형 전자기기까지 광범위하게 사용되는 대표적인 체결용 기계 요소부품이다. 현재 휴대용 전자기기의 소형화 및 경량화가 급속히 진행되고 있다. 스마트 폰의 두께가 얇아지고, 웨어러블 기기 개발이 활발해지면서 그에 사용되는 요소부품의 개발기술 또한 요구된다. 소형화된 전자기기에 사용되는 볼트 및 체결부품 역시 소형화와 사용개수의 감소가 크게 요구된다. 체결부품의 크기가 작아지면 체결 토크와 풀림 방지 효과가 감소한다. 볼트에 작용하는 토크는 볼트의 체결력, 나사산 사이의 마찰력, 그리고 볼트머리 밑면과 나사면에 작용하는 마찰력에 의해 발생한다.(1) 볼트의 크기가 작아지면 체결부의 접촉면적과 나사산의 개수가 줄어들어 마찰에 의한 체결 토크가 감소한다. 그래서 체결성능을 유지 및 강화할 수 있는 초소형 체결부품의 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 초소형 볼트의 풀림 방지 기능을 강화하기 위한 연구를 수행하였다.

볼트의 체결력 및 풀림 방지 효과를 향상시키

† Corresponding Author, jbkim@seoultech.ac.kr
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

기 위해 와져(Washer) 또는 접착제 등이 사용된다.[2] Khashaba 등[3]은 와셔의 크기가 체결 토크에 미치는 영향을 연구하였고, Kim 등[4,5]은 볼트의 직경과 길이에 따른 체결력에 대해 연구하였다. Han 등[6]은 고장력 볼트 개선을 위해 나사의 치수를 변화시켜 유한요소 해석을 통해 응력분포를 분석하였고, Min 등[7]은 초소형 볼트의 나사산 각도가 볼트의 체결 토크에 미치는 영향을 연구하였다. Lee 등[8]은 초소형 볼트의 나사산 각도와 비트의 깊이가 볼트의 체결 토크에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Bhattacharya 등[9]은 진동을 받는 구조물에서 볼트의 체결력 약화를 여러 형태의 볼트에 대해 실험을 통해 비교 분석하였다. Pai와 Hess[10]는 진동이 가해지는 구조물에서 볼트의 체결력이 약화되는 현상을 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 최근에는 체결력을 높이기 위한 최적의 조임 토크 설정에 대한 연구도 진행되었다.[11]

볼트에 대한 연구는 체결력 관점에서 볼트의 형상 및 구조에 대한 연구가 진행되었고, 풀림 관점에서 와셔 및 접착제, 풀림방지 코팅 등에 관한 연구가 진행되었다. 볼트의 체결력 향상에 관한 연구도 중요하지만, 본 연구는 체결된 볼트의 풀림방지 효과를 중심으로 진행되었다.

본 연구에서는 SUS 계열의 초소형 볼트 머리 밑면에 쎄레이션 형상을 추가하여 휴대폰 등의 소재인 합성수지 PPA-GF50 피체결체에 체결된 후 풀리는 과정에서의 토크를 분석하였다. 피체결제의 항복 응력을 고려하여 체결 정도 및 쎄레이션 개수에 따른 풀림방지 효과를 유한요소 해석을 통해 분석하였다.

2. 해석 방법 및 모델링

Fig. 1은 쎄레이션 볼트 모델을 보여준다. M1.0미터 보통 나사의 머리 밑면에 쎄레이션을 추가하여 모델링 한 모습이다. 쎄레이션 개수를 변수로 총 5가지 모델에 대한 해석을 진행해 개수의 영향을 분석하고, 체결 깊이를 3가지 경우로 하여 각 경우에 따른 쎄레이션 볼트의 풀림방지 효과를 분석하였다. 해석은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS[12]를 사용하였다. 해석의 효율을 위해 나사산 부를 제거하고 모델링하여 쎄레이션의 효과만을 분석하였다. Fig. 2는 FEM 모델 및 경계조건을 나타낸다. 피체결체 아래면은 모든

Table 1 Material properties of bolt and nut

Material	Young's Modulus	Tensile Strength	Yield Stress	Poisson Ratio
SUS302	200GPa	930MPa	766MPa	0.3
PPA-GF50	17.9GPa	260MPa	18MPa	0.41

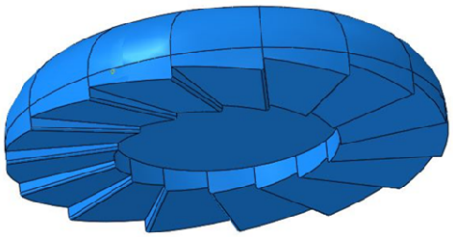


Fig. 1 Serration shape on bolt head

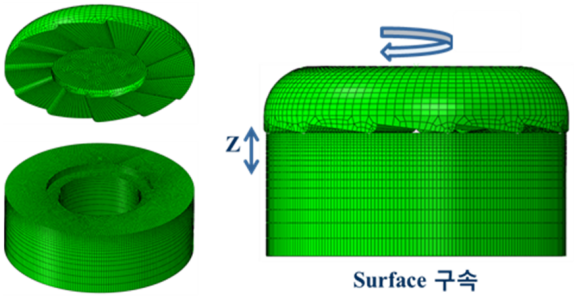


Fig. 2 Analysis model and boundary Conditions

변위를 구속하였고 볼트의 머리 윗면에 회전과 깊이방향 변위 경계조건을 부여하였다. 볼트의 회전에 따른 깊이방향 변위는 나사의 피치와 리드를 이용하여 부여하였다. 조임시에는 깊이 방향으로 풀림시에는 깊이 반대 방향으로 볼트의 변위를 주면서 해석을 진행하였다. Table 1은 재료의 물성이다.[13]

쎄레이션의 개수를 12, 14, 16, 18, 20개로 모델링하였다. 쎄레이션 볼트를 피체결체에 각 0.015 mm, 0.02 mm, 0.025 mm씩 체결하여 해석을 진행하여 피체결체의 소성변형 정도에 따른 풀림 방지 효과를 비교하였다. 각 모델 및 체결 깊이에 대해 총 15번의 해석을 진행해 그 결과를 분석하였다.

3. 해석 결과

3.1 쎄레이션 볼트 체결 및 풀림해석

Fig. 3은 볼트와 너트가 최종적으로 체결된 상태의 형상과 von-Mises 응력이고, Fig. 4는 볼트가

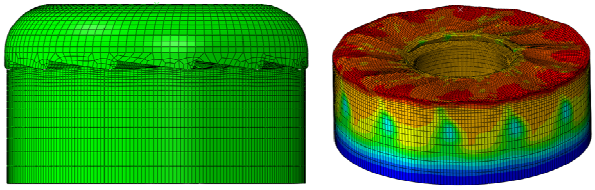


Fig. 3 Deformed shape after joining

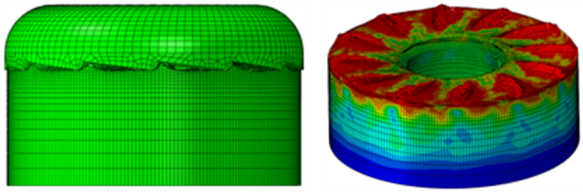


Fig. 4 Deformed shape after releasing

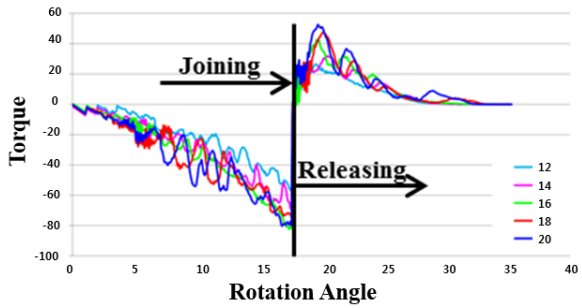
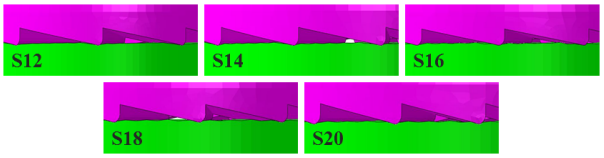


Fig. 5 Joining and release torque for joining depth of 0.015 mm

(a) After joining



(b) During releasing (10° release)

Fig. 6 Deformed shape various numbers of serration (joining depth = 0.015 mm)

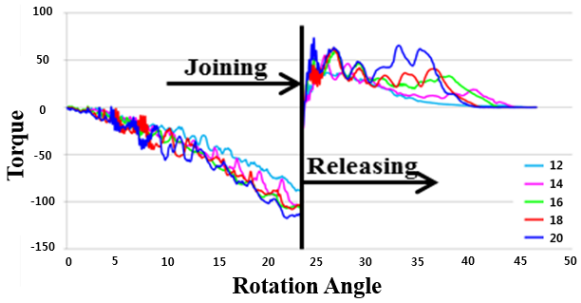


Fig. 7 Joining and release torque for joining depth of 0.020 mm

풀린 상태의 변형 형상과 von-Mises 응력을 보여준다. 이 때, 쎄레이션의 개수는 12개, 체결 깊이 0.025 mm, 피치 0.3 mm이다. 각도 30° 체결 후 풀림을 해석하였다. 마찰계수는 표면의 조건에 따라 다르지만 Coulomb 마찰계수 0.1을 적용하여 해석하였고 상대적으로 분석하였다. 조임시에 쎄레이션 형상이 너트 윗면에 성형이 된 것을 확인할 수 있고, 풀림시에 풀림에 대한 장애물로 작용하여 너트에 성형된 쎄레이션이 심하게 찌그러졌음을 알 수 있다. 이와 같은 쎄레이션 형상의 풀림방지 작용으로 인해 볼트가 잘 풀리지 않게 하는 것이 쎄레이션 볼트의 목적이다. 이와 같이 쎄레이션 형상이 너트에 성형이 되고 풀림시에 장애물로 작용하는 효과를 쎄레이션의 개수와 체결 깊이에 따라 분석하였다.

3.2 쎄레이션 개수와 체결 깊이의 영향

Fig. 5는 체결깊이가 가장 작은 0.015mm인 경우해석으로 예측한 토크-회전각도 그래프이다. 쎄레이션 개수가 증가함에 따라 최대 조임 토크와 풀림 토크가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 쎄레이션 개수가 많을수록 볼트를 조이고 푸는데 많은 힘이 필요한 것이다. 쎄레이션 개수가 14개 이하인 두 모델의 경우 풀림방지 효과가 크지 않았고, 16개 이상인 경우에는 최대 풀림토크가 약 100% 큰 것으로 보여 풀림방지 효과가 있는 것으로 사료된다. 그리고 모든 경우에 풀리는 부분의 풀림 토크 값이 높게 유지되지 않고 다소 빠르게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 쎄레이션에 의한 풀림방지 효과가 유지되지 않았다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 체결 깊이 0.015mm로 체결되었을 때와 풀림과정 에서 쎄레이션 개수에 따른 피체결체의 변형 모습이다. 쎄레이션 개수가 많을수록 피체결체의 변형이 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 체결깊이가 작아 그 변형의 차이가 크지 않고 쎄레이션의 풀림방지 효과는 모든 모델에서 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 체결 깊이 0.02mm일 때 해석한 결과 토크 그래프를 나타낸 것이다. 그래프에서 최대 조임 토크는 각 모델마다 약간(약 20%)의 차이가

(a) After joining

(b) During releasing (10° release)

Fig. 8 Deformed shape various numbers of serration (joining depth = 0.020 mm)

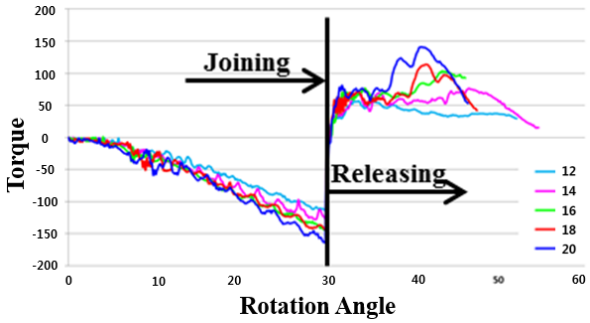


Fig. 9 Joining and release torque for joining depth of 0.025 mm

있지만 볼트가 풀리기 시작하는 토크 값은 쎄레이션 개수가 16개 이상인 세 모델의 경우 크게 차이가 나지 않는다. 풀림 부분에서 풀림 토크값을 체결깊이가 0.015 mm인 Fig. 5의 값과 비교해 보면, 체결깊이가 0.015mm일 때와는 달리 풀림 과정의 토크 값이 높은 값에서 다소 길게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 쎄레이션의 개수가 많은 모델일수록 그 값이 더 높게 유지된다. 최대 풀림토크는 쎄레이션의 개수가 증가함에 따라 커지고 약 100% 차이가 난다. 최대 풀림토크와 풀림토크 유지 성능을 볼 때, 쎄레이션이 16개 이상이 경우 풀림방지 효과가 있는 것으로 사료된다. Fig. 8은 체결깊이가 0.02 mm로 체결 되었을 때와 풀림과정 에서 쎄레이션 개수에 따른 피체결체가 변형된 모습이다. 체결깊이가 증가하면서 쎄레이션에 의한 피체결체의 변형이 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있고 이로 인해서 풀림토크가 증가한 것으로 사료된다. 쎄레이션의 개수가 많아질수록 변형된 정도가 크고 변형에 의해 생

(a) After joining

(b) During releasing (5° release)

Fig. 10 Deformed shape various numbers of serration (joining depth = 0.025 mm)

성된 턱의 높이가 높다. 이 턱이 볼트가 풀리는 것을 방해해 풀림 토크가 높게 유지되는 것이라고 사료된다.

Fig. 9는 체결깊이가 0.025mm인 경우 예측한 토크-회전각도 그래프이다. 쎄레이션 개수에 따라 최대 조임 토크 값은 약간의 차이가 있지만 최대 풀림 토크는 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 풀림 부분에서 큰 풀림 토크 값이 길게 유지되고 있고, 특히 쎄레이션 개수가 16개 이상인 세 모델의 경우 초기 볼트가 풀리기 시작하는 토크 값보다 최대 풀림과정에서 그 값이 더 증가하는 현상을 확인할 수 있다. Fig. 10은 0.025mm로 체결되었을 때와 풀림과정 에서 각 쎄레이션 모델의 피체결체가 변형된 모습을 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 8의 경우보다 체결깊이가 깊어진 만큼 피체결체의 변형도 최대로 발생한 것을 확인할 수 있다. 쎄레이션의 개수가 적은 모델의 경우에도 체결깊이가 작은 경우(Fig. 6, 8)보다 생성된 턱의 높이가 상당히 높아 풀림방지 효과가 나타난 것을 확인할 수 있다. 쎄레이션의 개수가 많을수록 그 폭이 좁고 각 쎄레이션 사이의 간격이 좁아 앞뒤의 쎄레이션 사이의 간섭으로 인해 턱의 높이가 높고 더욱 넓은 범위에 형성되어 풀림방지 효과가 더욱 증가하는 것으로 사료된다.

풀림 과정의 토크 값과 풀림 토크가 줄어드는 기울기는 체결된 볼트가 외부 충격이나 진동에 의해 풀리기 시작할 때 체결 유지에 대한 중요한 특성이다. 볼트의 풀림 방지를 위해 와서 등을 사용할 수 있지만, 초소형 볼트에서는 공간 등의 문제로 사용이 어려운 경우가 많다. 그렇기 때문

Table 2 Predicted maximum releasing torque of serration bolts

Number of Serration	Releasing torque (N.mm) for depth of joining		
	0.015 mm	0.020 mm	0.025 mm
12	26	45	58
14	33	55	75
16	42	60	105
18	45	62	113
20	52	73	140

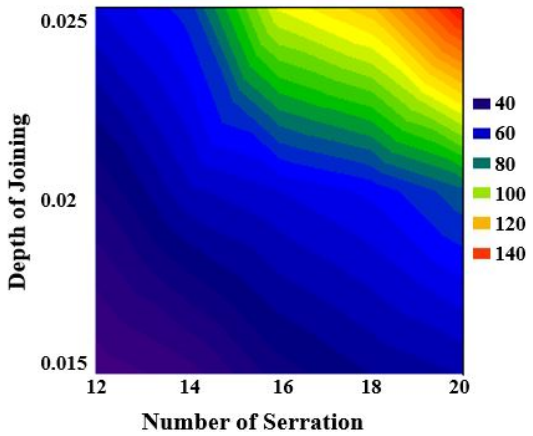


Fig. 11 Deformed curve for depth of 0.025 mm

에 초소형 볼트 자체가 그런 성능을 갖도록 설계할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서는 초소형 볼트에 쎄레이션 형상을 추가하여 풀림 과정에서 그에 따른 풀림 토크 값이 증가 또는 유지되는 현상을 중요한 관점으로 하여 연구를 진행하였다. Table 2에는 쎄레이션 개수와 체결깊이에 따른 최대 풀림 토크값을, Fig. 11은 최대 토크 값의 등고선도를 나타냈었다. 쎄레이션의 개수와 볼트의 체결 깊이 모두 최대 토크 값에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 오른쪽 상단의 원으로 표시된 부분이 그 최대인 것을 알 수 있고 그 때의 토크 값은 약 145N·mm이다. 해석결과로 쎄레이션 개수가 가장 많고 체결 깊이가 깊을수록 풀림 토크의 값이 증가한다고 판단이 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 쎄레이션 개수에 따른 초소형 볼트의 풀림방지 효과를 확인하고, 그 효과의 차이를 체결 깊이에 따라 분석하였다. 해석결과 0.015, 0.020, 0.025 mm 각 체결깊이 조건에서 쎄레이션 개수에 의한 최대 조임 토크는 약 20% 차이가 있었으나, 최대 풀림 토크는 약 100% 까지 차이가 남을 알 수 있었다. 체결 깊이가 가장 얕은 0.015mm인 조건에서는 모든 모델 피체결체의 변형이 거의 일어나지 않았고, 생성된 턱에 의한 풀림방지 효과가 나타나지 않았다. 체결깊이가 0.02mm인 경우 깊어진 체결 깊이에 따라 피체결체의 변형이 발생해 볼트의 풀림을 방해하는 턱이 생성되었다. 토크-회전각도 그래프를 통해 쎄레이션의 풀림방지 효과를 확인할 수 있었고 쎄레이션의 개수가 많을수록 그 효과는 상승하였다. 체결깊이가 가장 깊은 0.025mm인 경우 피체결체의 변형이 가장 크게 나타났고, 쎄레이션 개수가 가장 적은 모델의 경우에도 풀림방지 효과가 나타났다. 이 경우 쎄레이션 개수가 16개 이상인 세 모델의 풀림 과정에서 토크 값이 초기 풀림 토크 값 보다 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 쎄레이션의 개수가 많으면 그 사이의 간격이 좁아 그 쎄레이션에 의해 생성되는 턱이 앞 좁은 간격에 의해 더 높게 형성되어 풀림방지 효과가 증가하는 것으로 사료된다.

해석결과 쎄레이션 볼트의 체결 정도가 약할 경우(0.020 mm 이하)에는 쎄레이션의 개수가 16개 이상인 경우에만 쎄레이션 효과가 나타나고, 체결 깊이가 0.025 mm로 큰 경우에는 쎄레이션 개수가 12개인 경우에도 쎄레이션에 의한 풀림방지 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 체결 깊이가 깊을수록, 쎄레이션의 개수가 많을수록 쎄레이션에 의한 풀림방지 효과가 큰 것을 알 수 있었다. 쎄레이션의 개수가 커지고 체결 깊이가 깊을수록 쎄레이션에 의해 최대 풀림토크도 증가하고 풀림토크가 유지되는 성능도 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신산업(우주기술연구센터산업, 과제번호 : 10045724)의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌
(References)

(1) Jiang, Y., Chang, J. and Lee, C.-H., 2001, “An Experimental Study of the Torque-tenstion

Relationship for Bolted Joints," *Int. J. of Materials and Product Technol.*, Vol. 16, No. 4, pp. 417~429.

(2) Yan, Y., Wen, W.-D., Chang, F.-K. and Shyprykevich, P., 1999, "Experimental Study on Clamping Effects on the Tensile Strength of Composite Plates with a Bolt-Filled Hole," *Composites Part A: Appl. Sci. and Manufac.*, Vol. 30, No. 10, pp. 1215~1229.

(3) Khashaba, U. A. and Sallam, H. E. M., Al-Shorbagy, A. E. and Sief, M. A., 2006, "Effect of Washer Size and Tightening Torque on the Performance," *Composite Structures*, Vol. 73, No. 3, pp. 310~317.

(4) Kim, S. S., Kim, S. Y. and Kim, K. S., 2000, "Evaluation of Clamping Forces According to Length-to-diameter Ratios and Preserved Thread Lengths of High Strength Bolts," *J. of Korean Soc. of Steel Construction*, Vol. 12, No. 3, pp. 259~268.

(5) Kim, Y. H. and Kim, K. S., 1999, "Evaluation of Tightening Forces According to Length-diameter Ratios for High Strength Bolts," *J. of the Architectural Institute of Korea,* Vol. 15, No. 1, pp. 37~44.

(6) Han, J. W., Kim, J. H. and Park, Y. S., 2011, "Evaluation of Structural Performance and Improvement of Screw Thread Shape on 1,300 MPa High Strength Bolts," *J. of the Korean Soc. of Civil Eng.*, Vol. 31, No. 3A, pp. 189~198.

(7) Min, K. B., Kim, J.-B., Park, K. and Ra, S. W., 2014, "Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws According to Thread Angle Variation," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 9, pp. 839~846.

(8) Lee, H.-K., Park, K., Ra, S.-W. and Kim, J.-B., 2014, "Prediction of Joining Torque for Bit Depth of Subminiature Bolt," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 8, pp. 917~923.

(9) Bhattacharya, A., Sen, A. and Das, S., 2010, "An Investigation on the Anti-loosening Characteristics of Threaded Fasteners under Vibration Conditions," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, No. 8, pp. 1215~1225.

(10) Pai, N. and Hess, D., 2002, "Three-dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening due to Dynamic Shear Load," *Eng. Failure Analysis*, Vol. 9, No. 4, pp. 383~402.

(11) Hwang, H.-Y., 2013, "Bolted Joint Torque Setting using Numerical Simulation and Experiments," *J. of Mech. Sci. and Technol.*, Vol. 27, No. 5, pp. 1361~1371.

(12) ABAQUS, ABAQUS Manual, Version 6.12, Dassault Systems, USA, 2012.

(13) Matweb, http://www.matweb.com.