

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(12), 1004-1011(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.12.1004

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

신뢰성 있는 파이로테크닉 분리 너트 설계를 위한 진동 시 볼트 풀림 해석

최재영*, 우정민*, 강다훈*, 김정호*, 조진연**, 장승교***, 양희원****

Bolt Loosening Analysis under Transverse Vibration for Design of Reliable Pyrotechnic Separation Nut

Jae Young Choi*, Jeongmin Woo*, Dahoon Kang*, Jeong Ho Kim*, Jin Yeon Cho**,
Seung-gyo Jang*** and Hee Won Yang****Department of Aerospace Engineering, Inha University***,
Agency for Defense Development**, Hanwha Corporation****

ABSTRACT

Recently, pyrotechnic separation nut has attracted a considerable attention because of its shock reduction effect among various pyrotechnic mechanical devices. However, its bolt loosening behavior under transverse vibration has not been studied sufficiently, since segmented nuts are utilized instead of conventional nut in pyrotechnic separation nut. With the background, bolt loosening analyses are carried out referring to Junker vibration test. The analysis procedure consists of two steps. The first step is the bolt fastening step, screwing the bolt by fastening torque. The second step is the bolt loosening step under transverse vibration. Through the procedure, bolt loosening behaviors are obtained, and the effect of clearance on loosening behavior is closely investigated for reliable design of pyrotechnic separation nut.

초 록

최근 우수한 충격 저감 효과로 인해 파이로테크닉 분리 장치의 한 종류인 저충격 파이로테크닉 분리 너트에 많은 관심이 주어지고 있다. 하지만 파이로테크닉 분리 너트의 경우 일반 너트 대신 분할 너트가 사용되기 때문에 볼트 풀림 거동에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않은 측면이 있다. 이에 본 연구에서는 Junker 진동시험을 준거삼아 볼트 풀림 해석을 수행하였다. 해석은 크게 두 단계로 이루어져 있다. 첫 번째 단계는 체결토크를 이용하여 볼트를 분리너트에 체결하는 과정이고, 두 번째 단계는 횡 방향 가진을 통해 볼트가 풀리는 과정이다. 이러한 과정을 통해 볼트 풀림 거동을 얻을 수 있었다. 또한 신뢰성 있는 파이로테크닉 분리 너트의 설계를 위해 체결부 틈새가 볼트 풀림 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

Key Words : PMD(파이로테크닉 장치), Pyrotechnic Separation Nut(파이로테크닉 분리 너트), Segmented Nuts(분할 너트), Bolt Loosening(볼트 풀림), Junker Vibration Test(Junker 진동시험)

† Received : September 13, 2018 Revised : -

Accepted : October 26, 2018

** Corresponding author, E-mail : cjy@inha.ac.kr

I. 서 론

PMD(Pyrotechnic Mechanical Device)는 화약을 이용하여 열, 압력 등을 발생시켜 발사, 제어, 구동, 분리 등 여러 기능을 수행하는 장치를 말한다[1]. 그 중에서, 구성품의 결합과 분리를 목적으로 사용하는 장치를 파이로테크닉 분리 장치라고 한다.

파이로테크닉 분리 장치는 주로 발사체의 단분리에 사용되며, 체결 상태를 유지하다가 원하는 시점에 도달하면 구성품의 분리를 유발하는 것이 그 목적이다. 일반적으로 사용되는 분리 장치로는 폭발볼트가 있다. 그러나 폭발볼트의 경우 화약 폭발 시 발생하는 큰 충격파로 인해 구조물이나 전자장비가 손상될 수 있고, 결국 이는 임무 실패로 이어질 수 있다[2]. 이에 비해, 화약의 연소를 통해 발생된 압력을 이용하여 분리 임무를 수행하는 저충격 파이로테크닉 분리 너트는 이러한 단점을 개선한 장치이다.

Figure 1에는 분할 너트를 이용한 저충격 파이로테크닉 분리 너트의 형상을 도시하였으며, Fig. 2에는 네 조각으로 나뉜 분할 너트가 조립되어 있는 모습을 도시하였다. 분할 너트를 이용한 저충격 파이로테크닉 분리 너트의 구동 과정은 다음과 같다. 화약 연소 시 발생한 고압가스는 확장 챔버(Expansion chamber)로 유입되고, 높아진 확장 챔버의 압력에 의해 구속원통(Constraint cylinder)은 위쪽 방향으로, 누름봉(Push rod)과 방출핀(Ejector)은 아래쪽 방향으로 움직인다. 움직이던 구속원통이 특정 위치에 도달하면, 분할 너트는 구속이 풀리면서 밀판(Base)의 돌출부를 타고 반경 방향으로 벌어진다. 이 때문에, 체결부의 체결력이 낮아지면서 볼트가 분리된다. 이 때, 볼트를 밀어주는 방출핀은 볼트가 좀 더 원활하

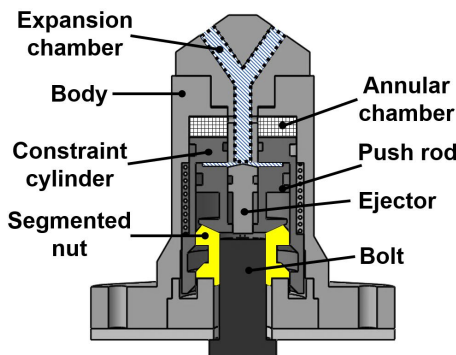


Fig. 1. Configuration of pyrotechnic separation nut using the segmented nuts[4]

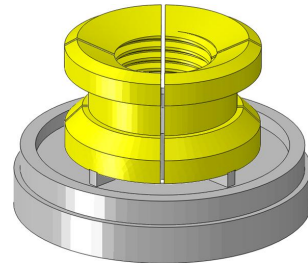


Fig. 2. Assembled state of the segmented nuts

게 분리될 수 있도록 도와준다[3,4]. 그리고 분리과정 중에 환형챔버(Annular chamber)로 유입된 연소 가스는 완충작용을 통해, 분리과정 중에 구성품이 받는 충격을 감소시킨다[3].

한편 발사체에 탑재된 파이로테크닉 분리 너트는 임무 수행 과정에서 열, 진동과 같은 다양한 외력들에 의해 영향을 받는다. 그 중에서도, 발사체 내부에 탑재된 장치의 특성상, 장치의 체결부가 반복적인 진동을 받으면 체결력을 잃고 볼트 풀림(Bolt Loosening)[5]이 발생할 수 있으며, 이는 원치 않는 시점에서의 분리로 이어질 수 있다. 특히, 구성품 제조과정에서, 분할 너트와 구속원통 사이에 틈새가 발생하게 되면 볼트 풀림 경향이 달라질 수 있다.

이에 본 논문에서는 장치의 체결부를 구성하는 분할 너트와 구속원통 사이의 틈새 유무에 따라 발생할 수 있는 볼트 풀림에 대해 다루었다. 통용 허용오차[6]를 고려하여 틈새의 크기를 0.00 mm, 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm로 분류하였고, Junker 진동시험(Junker vibration test)[7]을 참고하여 형상 모델링을 진행하였다. 또한, 체결부에 반복적인 진동을 인가하여 볼트 풀림 해석을 수행한 후, 틈새에 따른 볼트 풀림 경향을 고찰하였다.

II. 본 론

2.1 진동에 의한 볼트 풀림

2.1.1 진동에 의한 볼트 풀림 현상

볼트 풀림이란 진동, 열, 충격 등 다양한 외력에 의해 볼트가 스스로 풀리는 현상을 말한다. 다양한 외력들 중, 볼트 풀림에 가장 큰 영향을 미치는 외력은 진동이며, 볼트 축 방향 진동보다 볼트 축과 수직인 횡 방향의 하중의 영향이 지배적인 것으로 알려져 있다[5,8].

외력이 없다면, 볼트 자리면과 나사산에 존재

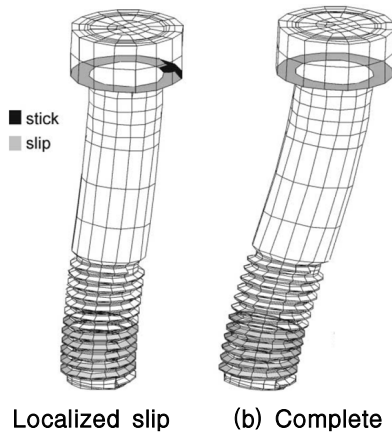


Fig. 3. Loosening process characterized by localized and complete slip[9]

하는 풀림 모멘트에 저항하는 원주방향 마찰력에 의해 볼트는 체결 상태를 유지한다. 그러나 진동판이 횡 방향으로 진동하는 경우, 볼트에 작용하는 전단력에 의해 원주방향 마찰력이 감소하게 된다[9]. 이러한 과정이 반복되면서 볼트 자리면과 나사산이 풀림 방향으로 미끄러지고 회전하게 된다.

Figure 3은 볼트에 횡 방향 하중이 가해질 때의 볼트 풀림을 stick과 slip으로 나타낸 과정이다. Stick은 구성품이 접촉해있는 상태를 나타낸다. Slip의 경우, 전체 접촉면이 미끄러지는 상태인 complete slip과 접촉면의 일부분만 미끄러지는 상태인 localized slip으로 분류할 수 있다. 볼트 풀림은 볼트 자리면에서의 미끄러짐이, Fig. 3처럼, localized slip에서 complete slip으로 변화할 때 급격하게 발생한다[9].

2.1.2 Junker 진동시험

Junker 진동시험은 볼트 풀림을 정량적으로 측정할 수 있는 가장 대표적인 진동시험 방법으로, 1960년대 말 독일의 엔지니어인 Gerhard Junker에 의해 처음 고안되었다. Junker 진동시험은 볼트 축에 수직인 횡 방향 하중 조건에서 체결부의 풀림을 확인하는 시험이다[7]. 대표적인 시험 규격으로는 DIN 65151과 ISO 16130이 있다.

Junker 진동시험 장비는 Fig. 4와 같이 구성된다. 편심 기구(Eccentric)에 부착된 팔 모양 구조물(Arm)이 진동판(Top plate)과 연결되어 있고 진동판은 볼트와 고정물(Fixed base)에 장착된 너트에 의해 체결되어있다. 편심 기구가 회전하면, 진동판이 일정하게 운동을 하면서 반복적인

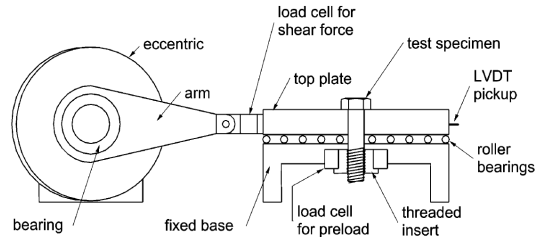


Fig. 4. Junker vibration test apparatus[9]

횡 방향 변위를 인가하는 방식으로 시험이 진행된다. 이 때, 진동판과 고정물 사이에 설치된 롤러 베어링(Roller bearing)은 횡 방향 운동 시 진동판에 발생할 수 있는 마찰을 최소화하는 역할을 한다. 이러한 방식으로 볼트에 반복적인 횡 방향 변위를 인가하여 볼트 풀림을 시험할 수 있다[9].

2.2 유한 요소 해석 모델링

2.2.1 분할 너트를 이용한 피로테크닉 분리 너트 모델링

분할 너트를 이용한 피로테크닉 분리 너트 체결부에서의 볼트 풀림 해석을 위해, Junker 진동시험을 참고하여 Fig. 5와 같이 모델링을 진행하였다. Fig. 5처럼 피로테크닉 분리 너트는 볼트, 진동판, 밑판, 분할 너트, 그리고 구속원통으로 구성되어 있다. 볼트의 경우, 나사의 직경이 14 mm이고 나사산의 피치(Pitch)가 1.5 mm인 M14×1.5 볼트를 사용했다. 네 조각으로 나누어진 분할 너트는, 일반 너트와 마찬가지로 볼트와 짝을 이뤄 체결 축력을 발생시킨다. 그러나 일반적인 너트와는 달리, 너트가 분할되어있기 때문에 체결 과정에서 분할 너트들이 반경 방향으로 벌어지지 않도록 구속해주어야 정상적인 체결이 가능하다[10]. 이 역할을 하는 것이 구속원통이

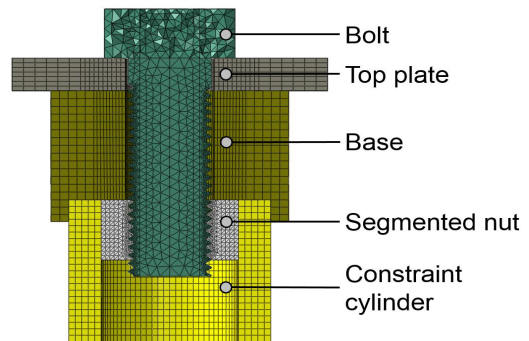


Fig. 5. Modeling of pyrotechnic separation nut using segmented nuts

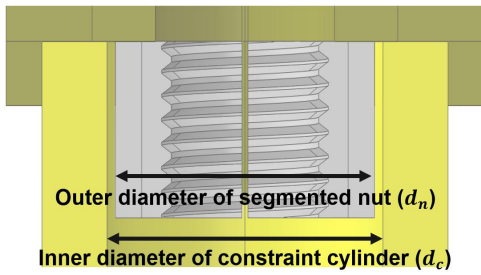


Fig. 6. Definition of clearance

다. 또한, 제작과정에서 발생한 오차로 인해 틈새가 생길 수 있다. 여기서, 틈새는 Fig. 6과 같이, 구속원통 내경과 분할 너트 외경의 차이로 정의하였다. 틈새의 크기에 따른 결과를 비교 분석하기 위해, 틈새가 0.00 mm, 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm인 형상들을 모델링하였다. 유한요소 모델링과 해석은 유한요소해석 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다.

2.2.2 진동에 의한 풀림 해석 방법

볼트 풀림 해석에 앞서, 틈새의 크기가 다른 각각의 모델에 대해 체결 해석을 수행하였다. 실제 볼트를 돌려 체결하는 방식을 모사하기 위해, 볼트 머리에 동일한 토크를 인가하여 체결 해석을 진행하였다. 여기서, 볼트 체결 방법은 강다훈의 공학석사학위 논문[11]에 명시된 체결 방법을 참고했다.

체결 후, Fig. 7과 같이, 실제 Junker 진동 시험과 동일하게 진동판 양 끝 옆면에 사인파의 형태로 횡 방향(X축 방향) 변위(A)를 인가하였다. 진폭은 ISO 16130 규격[12]을 참고하여 0.5 mm로 적용하였다[9]. 진동수의 경우, 40 Hz를 부여하였으며 20 주기 동안 반복하였다. 윤활제를 바른 상태를 모사하기 위해 볼트 자리면과 진동판 사이 접촉면의 마찰계수(μ_h)와 분할 너트와 볼트 나사산 사이의 마찰계수(μ_t)로 0.19[13]를 적용하였고 실제 진동시험에서 사용하는 롤러베어링을

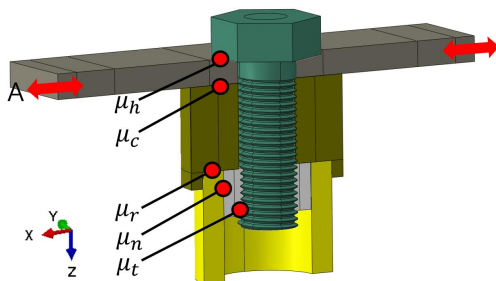


Fig. 7. Bolt loosening analysis condition

모사하기 위해 진동판과 밀판 사이의 마찰계수 (μ_c)는 0(Frictionless)을 적용하였다. 밀판과 구속원통 사이의 마찰계수(μ_r)와 분할 너트와 구속원통 사이의 마찰계수(μ_n)는 0.3[14]을 적용하였다.

틈새 크기에 따른 네 개의 모델에 동일한 해석 조건을 적용하여 볼트 풀림 해석을 수행하였다.

2.3 해석 결과

2.3.1 히스테리시스 곡선

Figures 8~11은 틈새 크기에 따른 첫 주기와 마지막 주기의 히스테리시스 곡선이다. 여기서 CL000, CL003, CL006, 그리고 CL010은 각각 틈새가 0.00 mm, 0.03 mm, 0.06 mm, 그리고 0.10 mm를 의미한다. 틈새의 크기에 따른 볼트 풀림 해석 결과를 토대로, 처음과 마지막 주기에서의 히스테리시스 곡선을 분석하였다.

틈새가 존재하지 않는 경우의 히스테리시스 곡선을 나타낸 Fig. 8을 보면, 첫 주기와 마지막 주기의 곡선 형상이 유사함을 알 수 있다. 그러나 틈새가 존재하는 경우의 히스테리시스 곡선을 나타낸 Figs. 9~11에서는, 첫 주기에 비해 마지막 주기의 곡선의 면적이 작아진다. 특히 Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 틈새의 크기가 커짐에 따라 마지막 주기에서의 전단력이 더 많이 감소하고 곡선의 면적이 작아지는 경향을 확인할 수 있다.

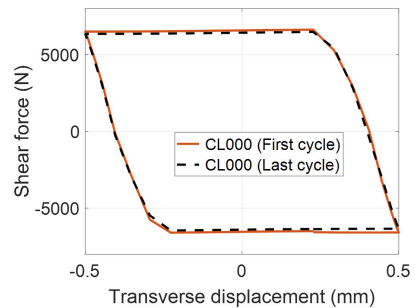


Fig. 8. Hysteresis curves (CL000: 0.00 mm)

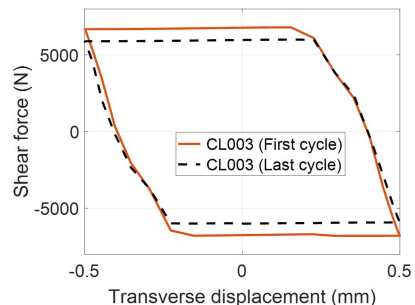


Fig. 9. Hysteresis curves (CL003: 0.03 mm)

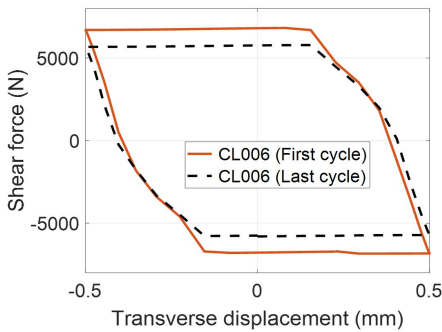


Fig. 10. Hysteresis curves (CL006: 0.06 mm)

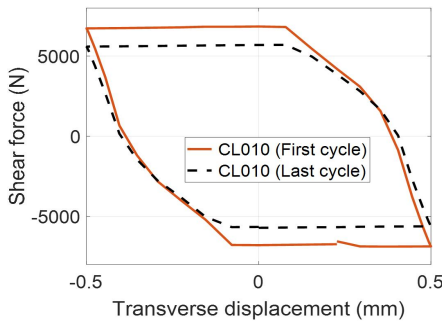


Fig. 11. Hysteresis curves (CL010: 0.10 mm)

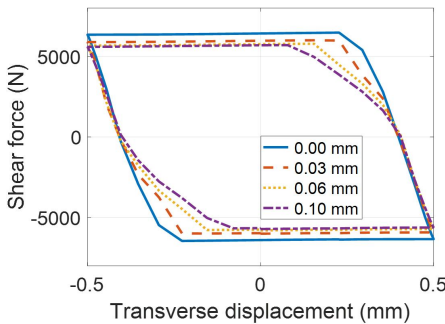
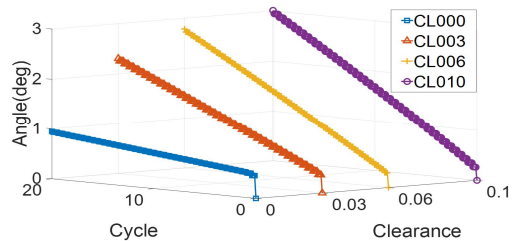


Fig. 12. Hysteresis curve for last cycle according to the clearance

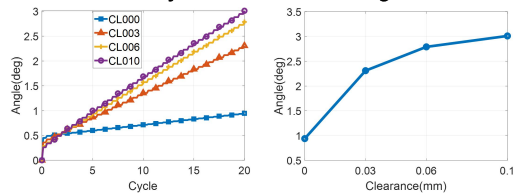
진동판에 일정한 변위를 인가하는 방식으로 모델링하였기 때문에, 히스테리시스 곡선의 면적은 해당 주기 동안에 체결부에서 소산된 에너지를 의미하고, 그 크기가 작다는 것은 그만큼 작용하는 체결 축력과 볼트 자리면과 진동 판 사이의 마찰력이 감소했음을 의미한다. 즉, 면적이 작을수록 볼트가 더 많이 풀려있음을 의미한다.

2.3.2 볼트머리 회전각도 변화

볼트머리의 회전각도 변화를 통해 볼트의 풀림을 직접적으로 확인할 수 있다. 각 모델들의 유한 요소 해석 결과에서, 동일한 볼트머리의 절점



(a) Cycle-clearance-angle



(b) Cycle-angle (c) Clearance-angle

Fig. 13. Change of turn angle according to the cycle and clearance

을 선택하고 20 주기 동안 해당 절점에서의 각도 변화를 확인하였다. Fig. 13(a)는 볼트머리 회전각도 변화를 주기와 틈새에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 13(a)를 통해서 특정 주기와 특정 틈새일 때의 대략적인 볼트머리 회전각도를 예측할 수 있다. Fig. 13(b)는 20 주기 동안 틈새 크기별 볼트머리 회전각도 변화를 나타낸 그래프이다. 틈새가 0.00 mm일 때에 비해, 틈새가 커질수록 풀림 방향으로의 볼트머리 회전이 많이 발생함을 알 수 있다. Fig. 13(c)는 20주기 이후의 틈새 별 볼트머리 회전각도를 나타낸다. 각 틈새의 크기에 따라서, 20 주기 이후의 볼트머리가 회전한 각도를 Table 1에 정리하였다. 틈새가 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm일 때의 볼트머리 회전각도는 틈새가 0.00 mm일 때에 비해 약 2.5배, 3배, 3.2배 증가하였음을 알 수 있다.

한 주기 안에서의 각도 변화를 확인하기 위해서, Fig. 14와 같이 마지막 주기의 틈새 크기에 따른 볼트머리 회전각도를 살펴보았다. Fig. 14를 통해 틈새가 없는 경우에 비해 틈새가 존재할 때

Table 1. Turn angle of bolt head after 20 cycles

Frequency (Hz)	Clearance (mm)	Turn angle after 20 cycle (deg)
40	0.00	0.94
	0.03	2.31
	0.06	2.79
	0.10	3.01

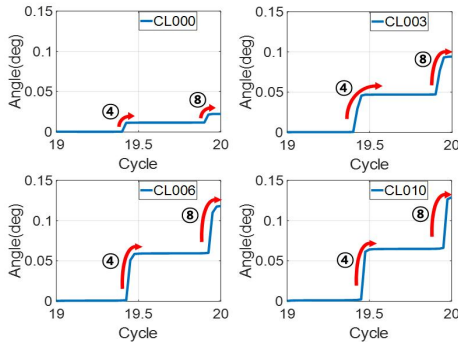


Fig. 14. Change of turn angle during last cycle according to the clearance

볼트머리가 더 많이 회전함을 알 수 있다. 또한 틈새가 커질수록 ④와 ⑧구간에서의 기울기가 급격해짐을 볼 수 있고 볼트머리가 급격하게 회전하는 것을 Table 2를 통해 수치적으로 확인할 수 있다. 여기서, ④와 ⑧구간은 Fig. 15와 Fig. 16에 표기된 ④와 ⑧구간과 동일한 구간이다. 횡방향 변위가 원점으로 돌아오는 구간임과 동시에 히스테리시스 곡선의 기울기가 급격하게 변하는 구간인 ④와 ⑧구간에서 큰 각도의 풀림이 발생한다.

볼트가 크게 풀리는 구간에서 볼트의 stick, slip 상태를 확인하기 위해, Fig. 17과 같이 ④구

Table 2. Turn angle in each step according to the clearance

Step	Turn angle (deg)			
	0.00 mm	0.03 mm	0.06 mm	0.10 mm
④	0.0116	0.0468	0.0586	0.0631
⑧	0.0109	0.0471	0.0592	0.0649

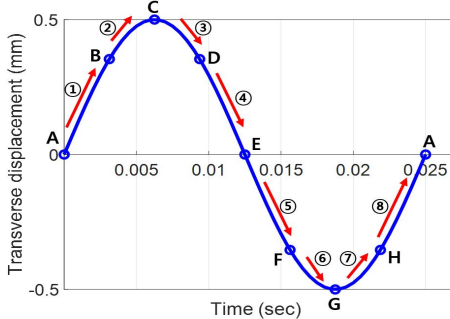


Fig. 15. 8 steps of applied displacement in a sinusoidal form

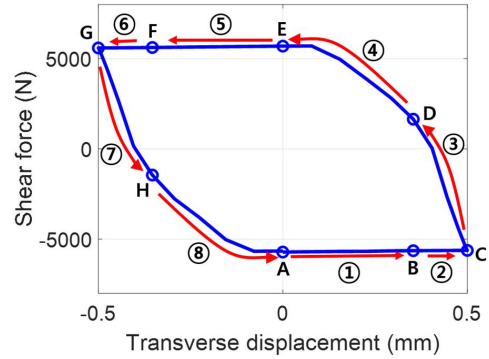


Fig. 16. 8 steps of hysteresis curve for last cycle

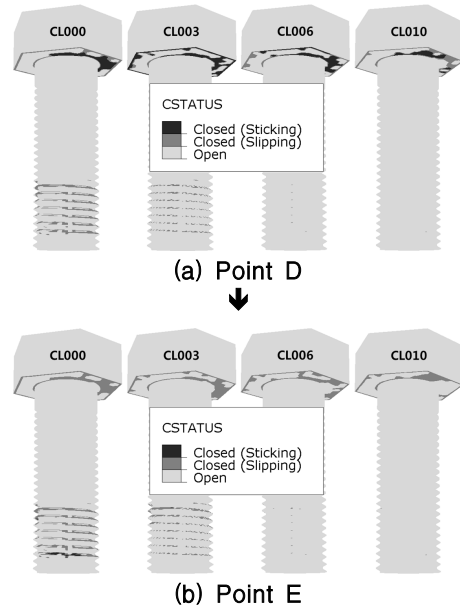


Fig. 17. Loosening process at step ④

간을 구성하는 점 D와 점 E에서 볼트의 stick, slip 거동을 살펴보았다. 점 D에서는 횡 방향 변위에 의해 볼트 자리면에서 localized slip이 발생하다가 점 E에서는 구성품 사이의 stick 상태가 없어지고 complete slip 상태로 변화한다. 이를 통해, localized slip에서 complete slip으로 변화할 때, 급격한 볼트머리의 회전이 발생함을 알 수 있다.

2.3.3 체결 축력의 변화

Figure 18(a)는 체결 축력 변화를 주기와 틈새에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 18(a)를 통해서 특정 주기와 특정 틈새일 때의 감소한 체결 축력을 대략적으로 예측할 수 있다. Fig. 18(b)는 20

III. 결 론

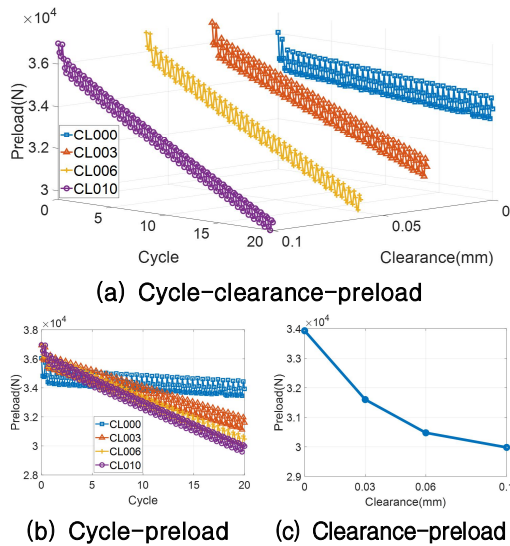


Fig. 18. Change of preload according to the cycle and clearance

주기 동안 체결 축력 변화를 틈새에 따라 나타낸 그래프이다. 틈새가 없는 경우에는 체결 축력이 서서히 감소하는 반면, 틈새가 존재하는 경우에는 체결 축력이 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 또한, 틈새가 커질수록 체결 축력이 더 급격하게 감소함을 알 수 있다. Fig. 18(c)는 20 주기 이후 틈새 별로 감소한 체결 축력을 나타낸다. Table 3에서는 각 틈새의 크기 별 초기 체결 축력 대비 체결 축력 감소율을 확인할 수 있다. 틈새가 0.00 mm인 모델의 경우, 20 주기 이후, 체결 축력이 초기 체결 축력에 비해 약 5.8 % 감소하였다. 틈새가 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm인 모델의 경우, 체결 축력 감소율이 각각 14.4 %, 17.4 %, 18.9 %로, 0.00 mm인 모델의 체결 축력 감소율에 비해 약 2.5배, 3배, 3.2배 증가하였다.

Table 3. Reduction rate in preload after 20 cycles

Frequency (Hz)	Clearance (mm)	Reduction rate of preload (%)
40	0.0	5.8
	0.03	14.4
	0.06	17.4
	0.1	18.9

본 논문에서는 분할 너트를 이용한 파이로테크닉 분리 너트 체결부에 횡 방향 진동 작용 시 발생할 수 있는 볼트 풀림에 관한 연구를 수행하였다. 분할 너트의 외경과 구속원통의 내경 사이의 틈새가 볼트 풀림에 미치는 영향을 확인하기 위해, 틈새를 0.00 mm, 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm로 분류하여 분할 너트를 이용한 파이로테크닉 분리 너트의 체결부를 모델링하였고, Junker 진동시험과 그 관련 규격을 참고하여 볼트 풀림 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로, 진동에 의한 볼트 풀림 경향을 세 가지 관점에서 분석하였다.

먼저, 첫 번째와 마지막 주기에서의 틈새 크기 별 히스테리시스 곡선을 확인하였다. 해석 결과, 틈새가 클수록 히스테리시스 곡선의 면적이 작음을 알 수 있었으며, 시간이 증가할수록 점차 히스테리시스 곡선의 면적이 감소함을 확인하였다. 여기서, 히스테리시스 곡선의 면적 크기는 볼트 풀림의 정도를 나타내기 때문에 틈새가 커질수록 볼트가 더 많이 풀렸음을 알 수 있다.

다음으로, 20 주기 동안의 볼트머리 회전각도를 통해서 볼트의 풀림을 수치적으로 확인하였다. 해석 결과를 통해, 틈새 별로 각각 0.94°, 2.31°, 2.79°, 3.01°만큼 풀림 방향으로 회전했음을 알 수 있었다. 틈새가 0.00 mm인 경우에 비해, 틈새가 커질수록 볼트머리 회전각도는 약 2.5배, 3배, 3.2배 더 회전했음을 알 수 있다.

마지막으로, 20 주기 동안의 틈새에 따른 체결 축력 감소 경향을 확인하였다. 틈새가 없는 경우, 완만한 체결 축력 감소 경향을 보이는 반면, 틈새가 커질수록 급격한 체결 축력 감소 경향을 보인다. 틈새의 크기에 따라, 초기 체결 축력에 비해, 20 주기 이후의 체결 축력이 5.8 %, 14.4 %, 17.4 %, 그리고 18.9 % 감소하였다. 틈새가 0.03 mm, 0.06 mm, 0.10 mm일 때의 체결 축력 감소율은 틈새가 0.00 mm일 때의 체결 축력 감소율에 비해 각각 2.5배, 3배, 3.2배 증가하였음을 알 수 있다. 여기서, 틈새에 따른 체결 축력 감소율의 증가 비율은 볼트 풀림 방향으로의 볼트머리 회전각도 증가 비율과 일치한다. 따라서 두 체결 축력과 볼트머리 회전각도는, 볼트머리가 회전한 각도만큼 체결 축력이 감소하는, 비례관계에 있음을 알 수 있다.

세 가지 관점에서 볼트 풀림 경향을 분석한 결과, 틈새가 커짐에 따라 볼트의 풀림률도 커짐을 확인할 수 있다. 볼트 풀림은 체결 축력의 감소

를 의미하고, 각 틸새 별로, 감소한 20 주기 이후의 체결 축력은 기존의 체결 토크의 약 93 %, 87 %, 84 %, 82 % 값으로 조였을 때의 체결 축력과 같다. 즉, 횡 방향 진동으로 인해 볼트 풀림이 발생하면, 작은 체결 토크를 인가하여 체결한 것과 별 차이가 없어지게 된다.

이처럼 분할 너트와 구속원통 사이에 존재할 수 있는 틸새는 진동 환경에 노출될 경우 파이로테크닉 분리 너트의 임무수행에 악영향을 끼칠 수 있다. 그러므로 이러한 악영향을 최소화하기 위해서는 요구된 설계 조건에 맞는 공차 관리가 필수적임을 확인하였다. 특히, 극심한 진동환경에서 운용될 경우에는, 공차관리 뿐만 아니라 풀림 방지 너트 혹은 다중 나사산을 갖는 특수 형태의 너트[15] 등 풀림을 원천적으로 방지할 수 있는 방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 ‘유도탄용 고성능 PMD 기술’사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

1) Kim, D. J., Lee, Y. J., and Kim, N. C., "The Type and Properties of the Separation Devices Using Pyrotechnics," *Proceeding of The 2016 Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, 2016, pp.209-213.

2) Kim, Z. I., Kim, D. J., Jung, D. H., and Kim, N. C., "Study on Technics of Decreasing Separation Pyro-shock of PMD," *Proceeding of The 2015 Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, 2015, pp.543-546.

3) Woo, J. M., Jang, J. S., Cho, J. Y., Kim, J. H., Roh, T. S., and Yang, H. W., "Design Concept of Pyrotechnic Separation Nut," *Proceeding of The 2015 Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, 2015, pp.377-381.

4) Woo, J. M., Cha, S. W., Cho, J. Y., Kim, J. H., Roh, T. S., Jang, S. G., Lee, H. N., and Yang, H. W., "Prediction of Pyroshock-Reduced Separation Nut Behaviors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 34, No. 5, 2018,

pp.1240-1255.

5) Bickford, J. H., *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints: Non-Gasketed Joints*, 4th ed., CRC Press, New York, 2008.

6) ISO 286, *Geometrical Product Specifications (GPS) - ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes*, 2010.

7) Junker, G. H., "New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration," *SAE Transactions*, 1969, pp.314-335.

8) Liu, J., Ouyang, H., Feng, Z., Cai, Z., Liu, X., and Zhu, M., "Study on Self-Loosening of Bolted Joints Excited by Dynamic Axial Load," *Tribology International*, Vol. 115, 2017, pp.432-451.

9) Pai, N. G. and Hess, D. P., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening Due to Dynamic Shear Load," *Engineering Failure Analysis*, vol. 9, No. 4, 2002, pp.383-402.

10) Woo, J. M., Kang, D. H., Choi, J. Y., Kim, J. H., Cho, J. Y., Jang, S. G., and Yang, H. W., "Effect of Clearance on Clamping Characteristics of Segmented Nuts in Pyrotechnic Separation Nut," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 11, 2018, pp.994-1003.

11) Kang, D. H., "A Study on the Nut Factor of Segmented Nuts in the Pyro Separation Nut," Master's Thesis, Inha University, Incheon, Republic of Korea, pp.26-27.

12) ISO 16130, *Aerospace series - Dynamic Testing of the Locking Behaviour of Bolted Connections under Transverse Loading Conditions (vibration test)*, 2015.

13) VID 2230, *Systematic calculation of high duty bolted joints - Joints with one cylindrical bolt*, 2003.

14) Urone, P. P., *Physics with health science applications*, John Wiley & Sons, 1985.

15) Lee, W. H., Huh, Y., Cho, S. K., Koo, J. M., and Seok, C. S., "A Study on the Development of Loose Prevention Bolt and Nut," *Proceeding of The 2007 Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, 2007, pp.529-530.