

나사 풀림 방지를 위한 걸림턱 구조의 와셔 개발 및 성능 비교

오영탁*, 김기대**,#

*신안산대학교 기계과 **대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Development and Benchmark Test of Hole-Boss Locking Washers for the Prevention of Vibrational Loosening

Young-Tak Oh*, Gi-Dae Kim**,#

*Department of Mechanical Engineering, Shin Ansan Univ.

**Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic Univ.

(Received 17 April 2020; received in revised form 28 May 2020; accepted 29 May 2020)

ABSTRACT

In this study, hole-boss locking washers were developed to prevent vibrational loosening, and a benchmark test was conducted to compare these washers with existing wedge locking washers, which are imported and high-priced. The developed washers consist of an upper washer with bosses and a lower washer with holes, and the bosses are caught in the holes so that the bolt is not loosened. Additionally, the top side of the upper washer and the underside of the lower washer have small wedges perpendicular to the direction of the bolt loosening, suppressing slips. A test by the Korea Test Laboratory indicated that the ratio of the loosening torque to the joining torque is greater than 70%, confirming that the developed washers have a sufficiently high anti-loosening performance. A Junker test apparatus was manufactured for the testing of vibrational loosening and a test comparison between the proposed washers and the existing wedge locking washers shows that the proposed washers have a slower reduction in the clamping force and a higher loosening-resistance in a vibrational circumstance compared with the wedge locking washers. These results indicate that the developed washers demonstrate a high performance and boast price competitiveness.

Key Words : Hole-boss Locking Washer(걸림턱구조 풀림방지 와셔), Wedge Locking Washer(뺨기형 풀림방지 와셔), Vibrational Loosening(진동 풀림), Junker Test Apparatus(웅커시험 장비), Clamping Force(볼트 체결력)

1. 서 론

와셔(washer)는 나사나 볼트 체결용 부품의 일종

으로 볼트 체결 시 볼트 머리와 체결 소재 사이에 삽입된다. 일반적인 와셔인 평와셔의 경우 볼트 머리 부분의 압력을 분산시켜 체결되는 소재의 표면 손상을 줄이는 역할을 하고, 스프링 와셔 또는 접시(conical) 와셔는 진동에 의한 풀림을 줄이는 역할을 하며, 이불이(toothed lock) 와셔와 혀불이(tab) 와

Corresponding Author : gidkim@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2724, Fax: +82-53-359-6620

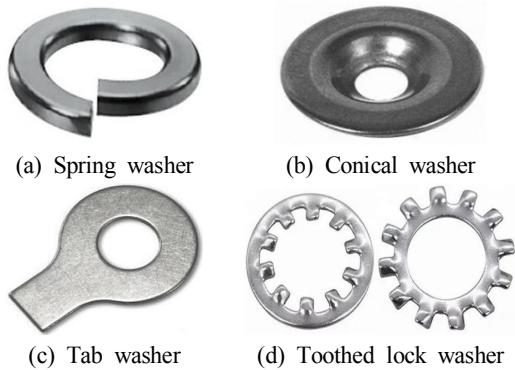


Fig. 1 Various types of washers

서의 경우 결합 부품이 움직이지 않도록 고정하는 역할을 하는 등 Fig. 1과 같이 매우 다양한 형태의 와셔가 볼트 체결용 요소 부품으로 사용되고 있다.

특히 교량 신축이음 장치나 고속철도 레일 고정 장치, 혹은 엔진 마운팅(engine mounting) 장치 등과 같이 반복적으로 진동이 가해지는 곳에 사용되는 볼트는 결합이 풀어질 위험이 있으며 이는 안전성을 저해하는 대단히 큰 위험 요소로 작용한다. 이처럼 주기적 또는 지속적인 진동이 가해지는 구조물이나 기계 부품을 체결할 때에는 볼트의 풀림 방지가 무엇보다 중요하다.

이러한 볼트 풀림을 방지하기 위하여 현재 너트 내부에 함성수지를 삽입한 록너트(lock nut)를 사용하여 볼트와 너트 사이의 마찰력을 증대시키는 방법, 스프링 와셔나 고무 와셔를 삽입하여 축방향의 인장력을 유지시킴으로서 볼트의 자립 잠김(self-locking) 조건을 더 강화하는 방법, 볼트와 너트에 같은 구멍을 뚫고 핀을 삽입하여 너트가 절대로 빠져나오지 못하도록 하는 방법, 흠불이 너트에 분할 핀을 끼워 너트의 회전을 방지하는 방법 등 다양한 방법이 사용되고 있다^[1]. 하지만, 록너트의 경우 우선 일반 너트에 비해 가격이 높고 또한 한번 체결되고 나면 풀기가 대단히 어렵다는 문제점이 있고, 스프링 와셔의 경우 주기적인 진동이 가해지는 기계 부품에서는 풀림 방지 효과를 오랫동안 계속 유지할 수 없다는 등의 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 주기적인 진동이 작동하는 환경에서도 볼트의 풀림을 장시간 억제할 수 있는 와셔를

개발하였다. 풀림 방지 기능을 갖춘 고가의 수입 와셔와 비슷한 성능을 유지하면서도 가격 경쟁력을 갖춘 걸림턱 구조의 와셔를 설계하고 와셔 시제품과 진동 시험기를 제작하였으며, 성능 비교 시험을 통해 개발된 와셔 시제품의 풀림 방지 성능을 검증하였다.

2. 연구의 개요

2.1 선행연구 고찰

일반적으로 체결용 나사에 축방향으로만 하중이 가해진다면 나사의 리드각(lead angle)이 자립 잠김 역할을 하여 나사가 풀어지는 경우가 드물지만, 횡방향 진동(transverse vibration)이 가해지는 경우에는 볼트가 풀어지는 현상이 뚜렷이 나타난다. 따라서 횡방향 진동이 지속적으로 가해지는 구조물이나 기계 부품에 있어서 볼트의 풀림방지 성능 확보는 제품의 신뢰성 및 안정성을 위해 반드시 담보되어야 한다.

볼트가 자가 풀림(self-loosening)되는 이유는 볼트 머리면과 고정물 상면 간의 접촉면, 그리고 볼트와 고정물의 나사면에서 완전히 혹은 부분적으로 미끄러짐(slip)이 발생하기 때문이다^[2]. 독일의 공학자 Gerhard Junker는 1960년대에 이러한 나사 풀림 현상의 중요성을 깨닫고 이를 실험적으로 측정하기 위하여 볼트와 와셔 등 기계 결합 요소가 횡진동에 의한 전단력을 받을 때 어느 시점에서 초기에 가한 예압(preload)이 풀어지는지를 측정하는 용커 시험법(Junker test)을 개발하였다^[3]. 이 시험 방법은 오늘날 나사 풀림 성능 표준 시험인 DIN 65151으로 발전하였다^[4].

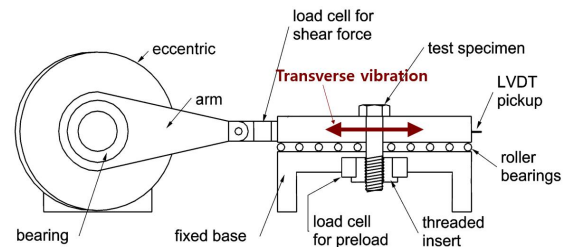


Fig. 2 Transverse-vibration Junker test apparatus^[3]

이후 여러 공학자들이 Fig. 2와 비슷한 진동 측정 장치를 자체 제작하고 볼트의 체결력과 와셔의 풀림 방지 성능에 대해서 시험하였다. Panja 등은 5Hz, 0.2mm 진폭으로 가진하며 체결 요소들의 체결력 변화를 측정 한 후, 스프링 와셔나 이불이 와셔의 풀림 저항성이 평와셔보다 우수하며 또한 너트의 체결 방법을 변화시킴으로써 풀림 저항성을 더욱 증가시킬 수 있음을 확인하였다^[5]. Dravid 등은 용커 테스트를 통해서 와셔를 사용하지 않으면 조임 토크 크기와 무관하게 볼트 풀림이 일정하게 진행되고 와셔를 사용하는 경우에는 조임 토크가 클수록 볼트 풀림이 지연됨을 확인하였다^[6].

2.2 썸기형 풀림방지 와셔 벤치 마킹

현재 국내에서 교량, 이음 장치 등 볼트에 높은 인장력과 주기적인 횡진동이 지속적으로 가해지는 환경에서 안정성이 우선시 될 경우에는 가격이 상당히 비싸더라도 Nord lock社(Sweden製)으로부터 ‘썸기형 풀림방지 와셔(wedge locking washer)’를 수입하여 사용하고 있다^[7]. 이 와셔는 Fig. 3와 같이 상면과 하면이 모두 썸기 구조이며 나사산 각보다 큰 경사각을 가진 와셔 두 개를 서로 맞대어 사용하는 구조이다.

볼트가 반시계방향 즉 풀림 방향으로 회전할 경우 우선 상와셔 상면과 하와셔 하면의 작은 썸기 구조가 볼트의 머리 및 접합물과 단단하게 물릴 수 있도록 되어 있다. 또한 상와셔 하면 및 하와셔 상면의 경사각(α)이 볼트의 나사산각(β)보다 더 크기 때문에 풀림 방향 회전 시 볼트에 축방향으로 인장력을 유발시키고 이것이 나사면에서의 마찰을

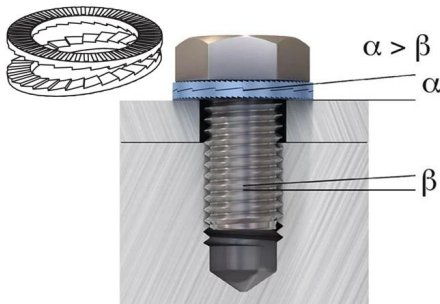


Fig. 3 Wedge locking (Nord lock) washers^[7]

더욱 증가시켜서 볼트의 풀림을 방지하는 구조이다. 이 와셔는 현재 풀림 방지 성능이 가장 우수한 와셔로 알려져 있으나 독과점 수입 제품이라 일반 와셔에 비해 가격이 매우 고가라는 문제를 가지고 있다. 따라서 기존 썸기형 풀림방지 수입품 와셔에 비해 가격이 훨씬 저렴하면서도 동등한 성능을 발휘할 수 있는 와셔의 국산화 개발이 꼭 필요하다.

2.3 연구의 개요

본 연구에서는 기존의 Nord lock 社의 썸기형 풀림방지 와셔를 벤치마킹하여 이를 대체할 수 있는 걸림턱 구조의 볼트 풀림방지 와셔를 설계하고 제작하였다.

시험평가 인증기관에 의뢰하여 개발 와셔 시제품을 사용한 볼트 체결에서의 조임 토크 대비 풀림 토크를 측정함으로써, 개발 와셔 시제품의 풀림 방지 성능을 1차 평가하였다.

횡진동이 가해지는 환경에서 개발 와셔의 볼트 풀림 방지 성능을 확인하기 위해 가진 실험 장비(Junker test apparatus)를 제작하였다.

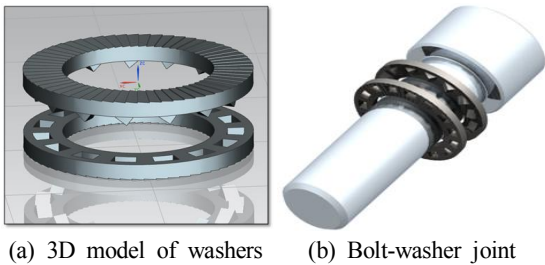
M14 및 M16 와셔 시제품과 기존의 썸기형 와셔 수입 제품에 대해 볼트 풀림 방지 성능 비교 진동 시험을 실시하고 개발 와셔의 성능을 검증하였다.

3. 연구 세부 내용 및 연구 방법

3.1 걸림턱 구조 와셔의 설계

본 연구에서 개발한 걸림턱 구조 와셔는 썸기형 노드락 와셔와 마찬가지로 이중 와셔 구조로 되어 있으나 상하면이 만나는 중간에 경사면 썸기를 가지는 대신에 상와셔의 하면에 걸림턱(boss)을 두고 하와셔에 홈(hole)을 가지게 함으로써 상와셔의 걸림턱이 하와셔의 홈에 걸려 볼트의 풀림을 억제할 수 있도록 하였다. 볼트 머리 하면과 접촉되는 상와셔의 상면과 피고정물과 접촉하는 하와셔의 하면에는 기존 썸기형 와셔와 마찬가지로 볼트 풀림 방향과 직각을 이루는 썸기들을 가지게 함으로써 와셔와 볼트 및 피고정물 사이에서 미끄러짐 발생이 억제되도록 하였다.

이러한 개념 설계 후 상세 설계를 통하여 Fig. 4



(a) 3D model of washers (b) Bolt-washer joint
Fig. 4 Hole-boss locking washers developed in this study

에서 보는 바와 같이 원주면을 따라 15개의 삼각기둥 형상의 썰기와 홈이 형성되고, 와셔가 볼트 및 피고정물과 접촉하는 면에는 동일 간격으로 68개의 작은 썰기를 가지는 구조의 이중 와셔를 설계하였다.

3.2 와셔 시제품 제작

본 연구에서 설계한 걸림턱 구조 와셔의 성능을 검증하기 위하여 프레스 공정을 통해 고탄소 공구강(SK5) 재질의 M14, M16 와셔 시제품을 제작하였다.

걸림턱 구조 와셔에 풀림 토크가 작용할 경우 상 와셔 상면과 볼트 하면, 그리고 하와셔 하면과 고



(a) Upper washer top side (b) Upper washer underside
 (c) Lower washer top side (d) Lower washer underside
Fig. 5 Prototype of hole-boss locking washers(M14)

정물 상면이 서로 미끄러지지 않아야 하고 그러기 위해서는 Fig. 5(a)와 (d)에 보이는 작은 썰기들이 볼트 및 고정물의 표면경도보다 높아야 하기 때문에 프레스 공정 후 오스테퍼링(austempering) 열처리를 하여 썰기의 표면 경도를 HRC46 이상으로 향상 시킴으로써 걸림턱 효과에 의한 볼트 풀림방지 성능이 충분히 발휘될 수 있도록 하였다.

3.3 성능 검증용 진동 테스트 장비 제작

볼트와 와셔를 결합한 후에 볼트 반경 방향으로 주기적인 진동이 가해지면 볼트는 체결력이 점차 감소하게 되고 진동의 크기와 지속시간이 증가하면 결국 볼트는 완전히 풀어지게 된다. 본 연구에서는 가진 시 기존의 썰기형 풀림 방지 와셔와 개발된 걸림턱 구조 와셔의 나사 풀림 방지 성능을 비교하기 위하여 독일 공업 규격 DIN 65151에 기반하여 Fig. 6와 같은 진동 테스트 장비를 제작하였다.

모터축의 회전운동은 캠과 크랭크 샤프트를 거치면서 블록의 직선운동으로 변환되어 볼트 체결 지그를 최고 40Hz의 주파수 및 최대 ±1mm의 진폭으로 횡방향으로 가진시킬 수 있다. 가진 주파수는 모터 속도 제어를 통해 조절하고, 가진 진폭은 캠 내부에 스페이스(spacer)를 삽입하여 캠축의 중심을 모터 축 중심과 이격시킴으로써 조절한다.

로드셀(load cell)은 최대 100kN 까지 측정이 가능한 스트레인게이지 형을 사용하였으며, 로드셀 어댑터(adapter)를 통해 볼트와 결합시켰다. 볼트를 결합시킬 때의 초기 예압(preload)과 가진 시 볼트 체결력(clamping load)의 변화를 측정하였으며 이를 통해 볼트의 풀림을 판정하였다.

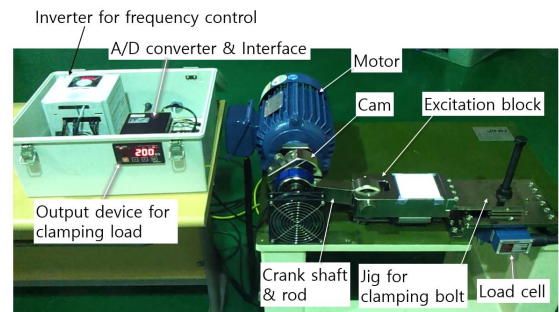


Fig. 6 Vibrational test apparatus

가진 블록의 하단에는 LM 가이드를 설치하여 직선 운동이 원활히 이루어지도록 하였으며 볼트 체결용 지그 하단에는 롤러 베어링을 설치하여 횡방향 직선 운동 시 발생할 수 있는 마찰을 최소화시켰다.

4. 실험 결과

4.1 조임 토크 대비 풀림 토크 시험 결과

일정한 크기의 조임 토크로 죄어진 볼트를 다시 풀기 위해서는 풀림 토크를 가해야 하는데, 풀림 토크가 크다는 말은 볼트를 풀기 어렵다, 즉 풀림 방지 성능이 우수하다는 것을 의미한다. 따라서 조임 토크 크기에 대한 풀림 토크 크기의 비율은 볼트 풀림 방지 성능 관점에서 대단히 중요한 인자이며, 산업 현장에서는 풀림 방지 와셔에 대해 이 비율이 70% 이상을 충족하도록 요구한다.

본 연구에서는 개발 와셔의 풀림 방지 성능, 즉 조임 토크에 대한 풀림 토크 비율의 절대값을 정확하게 측정하기 위하여 개발된 M14 및 M16 와셔 시제품 각 10개를 한국산업기술시험원(KTL)에 제공하여 측정을 의뢰하였다.(성적서 번호: 13-024239-01-1,2) 디지털 토크 렌치를 이용하여 M14 와셔의 경우 조임 토크를 11kgf·m로, M16 와셔의 경우 조임 토크를 13kgf·m로 하고 볼트를 전 후 다시 반대 방향으로 풀 때 어느 정도의 토크에서 나사가 풀어지는지를 측정하였다.

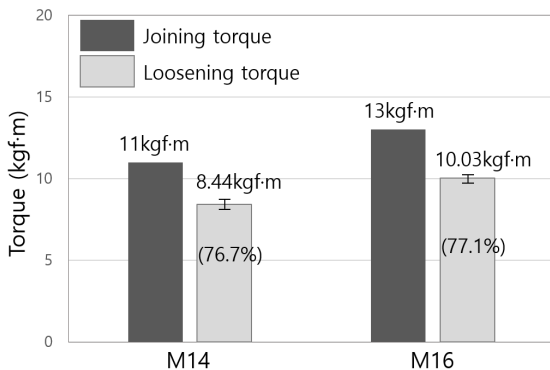


Fig. 7 Comparison of joining torque and loosening torque in bolt and developed washer clamping

측정 결과 M14 와셔의 경우 풀림 토크의 10회 평균값은 8.44kgf·m(표준편차 0.54)로서 조임 토크에 대한 풀림 토크 비율은 76.7%, M16 와셔의 경우 풀림 토크의 평균값은 10.03kgf·m(표준편차 0.47)로서 조임 토크에 대한 풀림 토크의 비율은 77.1%인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 걸림턱 구조 와셔는 개발 목표치인 70%를 상회하였음을 확인하였다.(Fig. 7)

4.2 가진 시 풀림 방지 성능 시험(윤커 시험) 결과

볼트 체결 시 볼트에 가해지는 인장력은 곧 볼트 체결력에 해당하며 이는 볼트의 풀림에 직접적인 영향을 미친다^[8]. 기존 썬기형 와셔 제품 M14/M16 각 10개와 개발 걸림턱 구조 와셔 시제품 M14/M16 각 10개를 추출하여 Fig. 6 장비에서 볼트 체결용 지그에 볼트와 와셔를 결합하고, Table 1과 같은 조건으로 주기적인 횡진동을 가하고 로드셀을 통해 볼트의 체결력이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

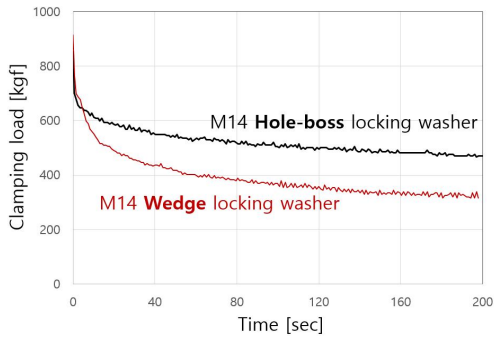
진동 시험에 앞서 우선 볼트 결합 시 초기 예압의 양을 결정하기 위하여 250초(10,000회 진동) 이상 가진하더라도 볼트 풀림이 전혀 발생하지 않는 예압의 범위를 구하였고 실제 시험에서는 이 값에 비해 상당히 낮은 수준으로 M14에서는 900kgf, M16에서는 1,200kgf 크기의 초기 인장력이 볼트에 가해지는 상황에서 볼트 풀림 가진 시험을 실시하였다.

시험 결과 우연하게도 M14, M16 모두 기존 썬기형 와셔의 경우 총 10회 중 총 6개의 샘플에서 볼트 풀림이 나타났으나, 개발 걸림턱형 와셔의 경우 총 2개의 샘플에서만 볼트 풀림이 나타났다.

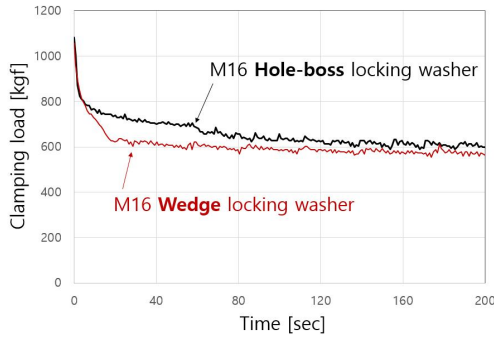
Fig. 8은 볼트 풀림이 발생하지 않은 경우 볼트 체결력의 변화를 보여준다. 기존 와셔, 개발 와셔 모

Table 1 Conditions of vibration experiment for anti-loosening capacity of washer

	M14	M16
Frequency [Hz]	40	40
Amplitude [mm]	± 1	± 0.6
Joining torque[kgf·m]	11	13
Preload [kgf]	≈ 900	≈ 1,200



(a) M14



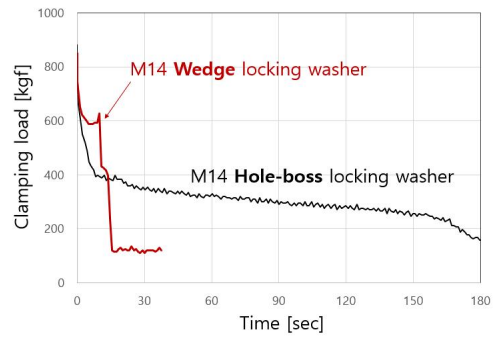
(b) M16

Fig. 8 Variation of clamping load (NOT loosened)

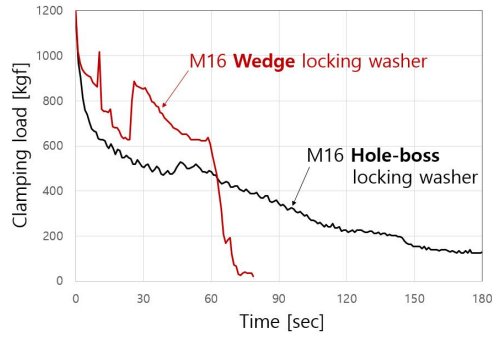


Fig. 9 Photograph of bolt and washers after 1,360 seconds vibration test

두 횡진동을 받는 순간 초기에 급격히 볼트 체결력이 감소되었고 그 이후에는 서서히 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 가진이 진행됨에 따라 개발 와셔가 기존 와셔에 비해 체결력이 감소되는 속도가 낮았고, 특히 Fig. 8(a) M14 와셔의 경우 이 차이가 더욱 확연히 나타났다.



(a) M14



(b) M16

Fig. 10 Variation of clamping load (Loosened)

Fig. 9는 동일한 조건으로 54,000회(1,360초) 이상의 진동시험을 무사히 마친 M16 볼트와 개발 와셔를 상태를 보여주는 그림이다. 볼트 머리에 상와셔 상면 썩기에 의해 변형된 흔적이 뚜렷이 나타나 있고 와셔 결립턱이나 홈의 손상이 없음을 볼 수 있으며, 이를 통해 개발 와셔의 풀림 방지 성능이 잘 발휘되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 진동 실험 결과 볼트 풀림이 발생한 대표적인 경우의 볼트 체결력의 변화를 보여주고 있다. Fig. 10(a)에서 M14 기존 썩기형 와셔의 경우가진이 시작되고 약 15초 후에는 체결력이 초기 예압의 약 1/8 수준으로 급격히 감소하여 볼트가 완전히 풀려버렸음을 보여주고 있다. 볼트가 풀어질 때 두 와셔가 접촉한 상태에서 두 경사면이 미끄러지며 경사면의 계단을 하나씩 넘을 때마다 체결력의 급격하게 저하되었음이 확인된다. 그러나 M14 개발 결립턱 구조 와셔의 경우 가진 초기 인장력이 감소한 이후에는 급격한 변화없이 상대적으로 안정

된 상태에서 서서히 볼트 체결력이 감소하다가 약 160초 이후 볼트가 풀렸음을 보여준다. Fig. 10(b) M16의 경우에도 기존 와셔의 경우 진동 후 약 70 초 만에 체결력이 급격히 감소하면서 볼트가 완전히 풀어졌으나 개발 와셔의 경우 진동이 가해짐과 함께 체결력이 감소하지만 기존 와셔와 같이 급격히 감소하는 구간 없이 볼트가 서서히 풀어지는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과로 미루어 개발 와셔는 기존 고가의 수입품 와셔에 대비하여 동등 이상의 풀림 방지 성능을 가진다고 말할 수 있으며, 개발 와셔의 가격을 기존 와셔 대비하여 50% 이하로 책정할 수 있으므로 가격 경쟁력 또한 클 것으로 판단된다.

5. 결 론

주기적인 진동이 가해지는 환경에서 볼트 풀림 방지 기능의 고가 수입제품인 썬기형 와셔를 대체할 수 있는 15개의 걸림턱과 같은 수의 구멍을 가지는 이중구조 와셔를 개발하고 그 성능을 검증하였다.

인증기관의 시험 결과 조임 토크 대비 풀림 토크의 비율이 70% 이상으로 측정되어 개발 와셔의 풀림방지 기능이 충분한 것으로 확인되었다. 가진 환경 진동 시험 장비인 용커 테스트 장치를 제작하고 기존 썬기형 와셔와 개발 와셔 시제품을 대상으로 진동 시 풀림방지 성능을 비교 시험한 결과 개발 와셔는 기존 와셔에 비해 볼트 체결력이 서서히 감소되고 동등 수준 이상의 풀림 저항성을 보임으로써 개발 제품의 성능과 가격 경쟁력이 우수한 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. Yoo, J. H., "Technology Trend of Bolt Locking Methods", Current industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 16, No. 1, pp. 111-117, 2018.
2. Pai, N. G., Hess, D. P., "Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening

- due to dynamic shear load". Engineering Failure Analysis", Vol. 9, Issue. 4, pp. 383-402, 2002,
3. Junker, G. H., "New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration", Transactions of the Society of Automotive Engineers, Vol. 78, pp. 314 - 335, 1969.
4. Deutsches Institut für Normung. "Dynamic testing of the locking characteristics of fasteners under transverse loading conditions (vibration test)", DIN 65151: 2002-08. Berlin: DIN; 2002.
5. Panja, B., Das, S., "A Study of Anti-Loosening Ability of 5/8 BSW Fasteners under Vibration with High Tension Steel and Stainless Steel Bolts", Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013), 2013
6. Shriram Dravid, S., Tripathi, K., Chouksey, M., "Role of Washers in Controlling loosening of Full Threaded Bolted Joints", Procedia Technology, Vol. 14, pp. 543-552, 2014, doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.069
7. www.nordlock.com
8. Jung, H. S., "Finite Element Modeling of Bolt Loosening of Bolted Joint", Proceedings of the KSMPE Autumn Conference, 2017