

자동차 헤드램프 내의 에이밍 볼트의 풀림 해석 및 실험

문지승¹ · 백홍¹ · 박상신^{2,*} · 박종명³

¹영남대학교 대학원 기계공학과, ²영남대학교 기계공학부, ³(주)SL

Analysis of Self Loosening of Aiming Bolts in Vehicle Head Lamp

Ji-Seung Moon¹, Hong Baek¹, Sang-Shin Park^{2,*} and Jong-Myeong Park³

¹Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University

²School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

³Corp. SL

(Received January 3, 2019; Revised January 30, 2019; Accepted January 31, 2019)

Abstract – Self-loosening of bolts owing to external forces occurs in several machines that are clamped by bolts and nuts. This study focuses on the self-loosening of the aiming bolt of the head lamp in a vehicle. It is important to prevent the aiming bolt from self-loosening as it has a decisive effect on the angle of the head lamp. A nut clamped with a bolt, known as a retainer, is made of plastic and has a partial screw thread. In addition, a transverse load has a considerable impact on the self-loosening of a bolt. We concentrate on the self-loosening of a bolt by a transverse load. The aim of this study is to define the limits of the external force that loosen the bolt. Based on the above conditions, we derive a theoretical equation and develop a numerical analysis program that can calculate the limiting forces for self-loosening. To verify the developed program, we design a test device that can measure the self-loosening by applying sliding forces to the aiming bolt. Using this method, we can draw the following conclusions. First, the developed testing device is suitable to prove the theory for calculating the self-loosening force. Second, the equation confirms the relationship of bolt self-loosening between resistance torque and shear force. Finally, the equation obtains the minimum value of the resistance torque required to decrease the change in the angle of the head lamp, thereby improving the possibility of increasing the stability of the head lamp.

Keywords – aiming bolt(에이밍 볼트), headlamp(헤드램프), resistance torque(저항 토크), self-loosening(풀림)

Nomenclature

F : Clamping force (N) (체결력)
 W : Transverse load (N) (축 직각 방향 힘)
 r_1 : Inner diameter of contact area (m) (내경)
 r_2 : Outer diameter of contact area (m) (외경)
 μ_s : Friction coefficient of thread surface

(나사산 단면의 마찰계수)
 μ'_s : Friction coefficient of triangular thread surface
(삼각 나사산 단면의 마찰계수)
 A_s : Contact area (m²) (접촉 면적)
 β : Lead angle (deg) (볼트의 리드각)
 θ : Angle of the bolt thread surface from the shear force direction (deg)
(접촉면 임의의 미소 위치의 각)
 φ : Angle of thread region (deg)
(나사산 영역의 각도)
 d_e : Effective diameter of thread (m)

*Corresponding author: pss@ynu.ac.kr
Tel: +82-53-810-3538, Fax: +82-53-810-4627
http://orcid.org/0000-0002-1201-558X

(나사산의 유효 직경)

h_1 : Short depth of thread (m) (짧은 나사산 깊이)

h_2 : long depth of thread (m) (긴 나사산 깊이)

1. 서 론

교통 법규에 따르면 자동차 헤드램프(head lamp) 조명의 방향은 일정 각도 내에 유지되도록 규정되었다. 따라서 이 각도를 조절해 줄 수 있는 볼트인 에이밍 볼트(aiming bolt)가 헤드램프에 설치되었다. 주행 중에 발생하는 외부의 진동에 의해 에이밍 볼트가 조이거나 풀리면서 조명의 각도를 변화시킨다. 이는 보행자나 맞은편 운전자의 시야를 방해하고 사고의 위험성을 증가시키기 때문에, 에이밍 볼트가 풀리지 않도록 설계하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 이를 풀리지 않도록 하기 위해 너무 큰 저항 토크를 갖도록 제작하는 경우, 볼트의 각도를 조절하기 힘들어지는 어려움이 따르게 된다. 따라서 적절한 회전 저항 토크 내에서 볼트가 풀리지 않는 한계에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

볼트 풀림 현상에 대한 연구로는 Sakai[1]가 볼트 스스로 회전을 일으키는 조건들을 정리하고 그 중 볼트에 수직인 방향 힘이 작용할 때의 볼트 풀림 이론식을 도출한 바 있다. 또한, 축 직각 방향 힘에 대해 슬립(slip)이 일어나는 평면에서의 마찰계수를 실험을 통해 도출하고, 볼트 풀림 조건과 일치한다는 것을 증명했다.

Sato 등[2]은 볼트의 축 방향 하중이 탄성 비틀림을 유도하고 볼트와 너트의 탄성 수축 및 팽창을 일으켜 결합된 표면에서 너트가 풀리게 된다는 조건으로 결합된 표면의 궤적을 고려한 풀림 이론을 증명했다.

Kasai[3]는 볼트와 너트 사이의 상대적인 변위가 생길 때, 볼트 샹크(shank)에 탄성 비틀림이 발생하고, 이로 인한 회복력이 볼트 풀림을 야기한다는 가정으로 어떻게 풀림이 생기고 증가하는지에 대한 이론을 도출했다.

그 외 Yokoyama 등[4]은 3차원 FEM 해석과 인장-비틀림 실험을 진행함으로써 회전 하중에 대한 볼트 풀림 원리를 설명했고, Koga[5]는 볼트 풀림에 영향을 주는 나사산 각도를 정의하는 이론식을 유도했다. G. Dinger 등[6]은 완전 슬립과 국부적 슬립에 따른 볼트 풀림 경향과 예압 후 잔여 샹크 토크 진행에 대한 연구를 진행했다. Koga 등[7]은 충돌 마찰을 고려한 볼트 풀림 경계 그래프를 제시하고, 이를 실험 결과와 비교하였다. Fujioka 등[8]은 로터리 디스크(rotary disc)의 결합 부품들의 풀림 원리에 집중하여 이를 이론식과 실

험을 통해 증명했다. 또한 국내에서는 공 등이 컴프레서 체결용 볼트의 적정한 토크 설정에 대해 연구한 바 있다[9].

하지만, 에이밍 볼트는 강 제품으로 제작되는 반면에, 너트의 경우, 플라스틱으로 제작되기 때문에 기존의 강 재질로 제작된 너트(nut)를 이용한 연구는 적용하기 어렵다. 플라스틱으로 제작된 너트와 에이밍 볼트 사이의 풀림을 일으키는 진동에는 볼트 축에 수직인 방향으로 진동하는 전단력, 축 방향 하중 및 모멘트 등의 하중이 있다. 그 중 전단력에 의한 풀림 문제가 가장 크다는 것을 확인하고, 전단력에 의한 풀림에 집중했다.

따라서 본 연구에서는 볼트의 풀림 토크가 회전 저항 토크보다 크게 되는 경우 볼트가 풀리게 됨을 수학적으로 유도하였으며, 이 유도식의 타당성을 검증하기 위해 에이밍 볼트에 전단 진동 하중을 가해주고 풀림을 측정할 수 있는 실험 장치를 개발했다.

2. 에이밍 볼트 풀림 이론

2.1. 헤드램프와 에이밍 볼트

헤드램프는 Fig. 1과 같이 2개의 에이밍 볼트와 1개의 피벗 볼트(pivot bolt)로 지지 돼있다. 외부 하중에 의해 에이밍 볼트가 축 방향으로 풀리거나 조이면 볼 조인트 역할을 하는 피벗 볼트가 움직이면서 헤드램프의 각도가 변하게 된다. Fig. 2는 본 연구의 해석 대상인 에이밍 볼트와 마찰 토크를 발생시키는 오링(o-ring), 푸시 너트(pushnut), 리테이너(retainer)의 3차원 형상을 나타낸다.

2.2. 자유물체도

축 직각 방향 힘에 의한 풀림 이론은 SAKAI[1]의

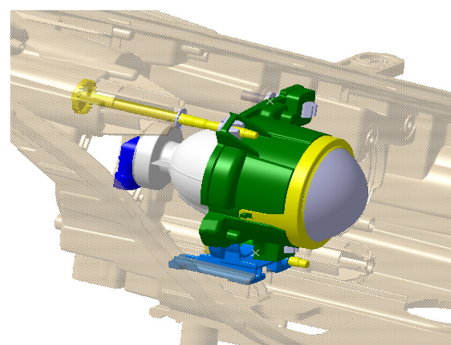


Fig. 1. Schematics of head lamp.

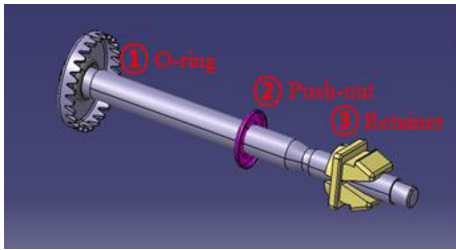


Fig. 2. Aiming bolt and nut.

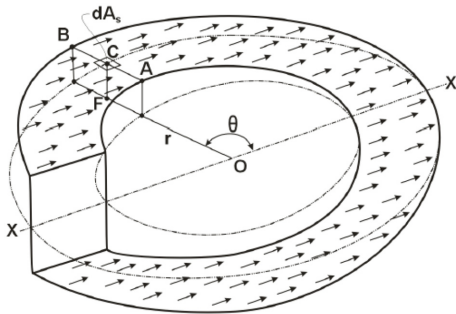


Fig. 3. Principle of self-loosening torque on the screw surface.

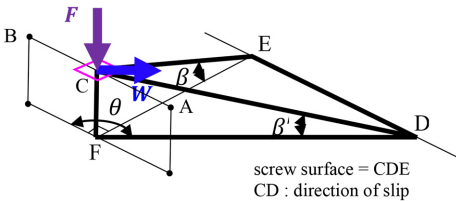


Fig. 4. DOF of screw surface.

논문을 기초로 본 연구의 해석 대상인 헤드램프 내 에이밍 볼트의 조건에 맞춰 유도하였다. 볼트에 전단력이 반복적으로 작용하면, 수나사와 암나사는 나사산 단면에서 상대적인 슬립이 일어난다. Fig. 3에서 중심선(X-X 선)을 기준으로 올라가려는 슬립과 내려가려는 슬립이 동시에 나타나는 것을 도식화하여 나타낸다.

Sakai[1]는 내려오려는 슬립 조건에서 Fig. 4의 자유물체도에 나타난 나사산 단면 CDE에 작용하는 수직력과 마찰 계수의 곱이 내려오려는 방향의 힘과 같다는 기본 이론을 통해 나사산 한 줄 당 내려가려는 토크와 올라가려는 토크에 대한 공식을 식(1)과 같이 유도했다. 두 토크의 차는 볼트의 최종 토크이며, 그 중 더 큰 값을 가진 토크의 방향에 따라 볼트가 풀리거나 조이게 된다.

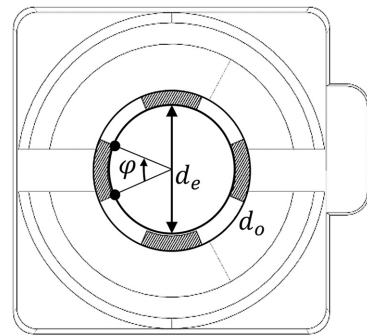


Fig. 5. Screw distribution of retainer.

$$T_{ss} = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\pi} \frac{F}{A_s} (\mu_s \cos\beta + \sin\beta') \cos\beta' r \sin\theta r d\theta dr$$

$$- \int_{r_1}^{r_2} \int_{\pi}^{2\pi} \frac{F}{A_s} (\mu_s \cos\beta - \sin\beta') \cos\beta' r \sin\theta r d\theta dr$$
(1)

이는 수나사의 단면에 나사산이 360도 전체 면에 존재했을 경우 유효한 식으로 수나사에 나사산이 부분적으로 존재하는 에이밍 볼트의 리테이너에 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이 부분을 고려한 식을 유도했다.

2-3. 에이밍 볼트 풀림 방정식

우선 나사산이 수나사 전체 면에 있을 경우의 풀림 토크를 유도하기 위해 볼트의 리드 각(lead angle)이 매우 작다고 가정하고 골지름과 바깥 지름의 평균값을 유효 직경으로 가정했다. 이와 같은 가정으로 위의 식을 정리하면 식(2)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$T_{ss} = \frac{F\beta 3d_o^2/4}{3d_e} = \frac{Fd_e\beta}{4}$$
(2)

Fig. 5는 리테이너의 윗면을 나타내며 어둡게 표시된 부분은 나사산의 위치를 의미한다. Fig. 5와 같이 나사산이 부분적으로 존재하는 리테이너의 나사산 유효 직경의 비를 다음 식(3)과 같이 정의했다.

$$d_e \frac{2\pi}{4 \times \phi}$$
(3)

식(3)을 통해 에이밍 볼트에 맞는 축 직각 방향 힘에 의한 풀림 토크를 정의하면 식(4)와 같다.

$$T_{ss} = \left(\frac{F_1 d_e \beta}{4} \times \frac{2\pi}{4 \times \phi} \right) + \left(\frac{F_2 d_e \beta}{4} \times \frac{2\pi}{2 \times \phi} \right)$$
(4)

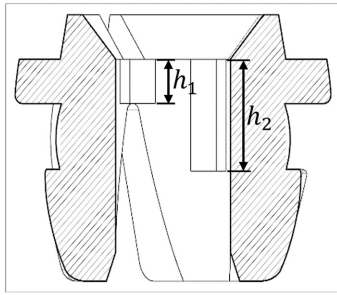


Fig. 6. Cross section of retainer.

리테이너 나사산의 깊이는 Fig. 6과 같이 h_1 과 h_2 로, 마주 보고 있는 것끼리 같다. 이때, 위 식에서 F_1 은 h_1 에 작용하는 힘이며 F_2 는 h_2 와 h_1 차이만큼의 깊이에 작용하는 힘이다. 이를 고려하여 각 힘을 정리하면 식 (5)와 같다.

$$F_1 = \frac{W}{\mu' \cos \beta} \times \frac{h_1}{p} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{W}{\mu' \cos \beta} \times \frac{h_2 - h_1}{p}$$

유도한 에이밍 볼트의 풀림 토크가 볼트와 결합되는 리테이너, 오링 및 푸시 너트 각각의 저항 토크보다 크게 작용하면 볼트가 풀리게 된다. 다음 식(6)을 이용하여 볼트가 풀리기 시작하는 전단력을 계산할 수 있다.

$$T_{ss}(F) \geq T_{Resistance} \quad (6)$$

위의 식에서 결합부에 의한 저항 토크의 식은 식(7)과 같고, 각 항들은 계산값이 아닌 측정값이다.

$$T_{Resistance} = T_{Retainer} + T_{O-ring} + T_{Pushnut} \quad (7)$$

3. 수치 해석

위의 이론을 활용하여 에이밍 볼트에 가해지는 외력 및 물성치, 마찰 토크 측정값을 입력하면 볼트의 풀림 토크를 계산함과 동시에 풀림 여부를 판별하는 수치 해석 프로그램을 개발했다. 이를 통해 서로 다른 물성치를 가진 볼트와 너트에 대한 해석이 가능하다. 여기서 프로그램 해석에 사용한 마찰계수는, 본 연구와 병행하여 진행한 마찰계수 실험에서 얻은 값인 0.05를 사용하였다. Fig. 7은 볼트에 작용하는 하중과 물성치를 다양하게 변화시켜 해석한 후 볼트에 결합된 리테이너의 저

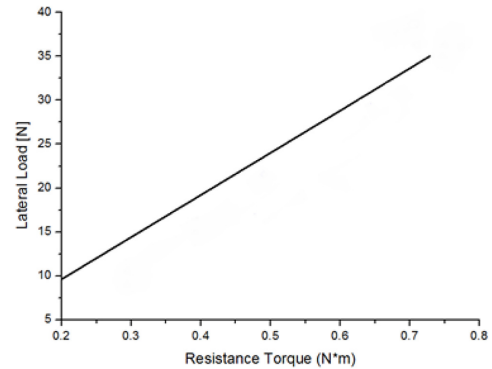


Fig. 7. Graph for lateral load and resistance torque.

항 토크에 대한 외력으로 나타낸 그래프이다. 그래프의 직선 윗부분은 볼트가 풀리는 영역을, 아랫부분은 풀리지 않는 영역을 나타낸다. 일반적으로 저항 토크가 증가함에 따라 볼트가 풀리는 외력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

4. 볼트 풀림 실험

4.1. 실험 장치 원리 및 구조

주어진 회전 저항 토크 내에서 에이밍 볼트에 영향을 주는 외부 전단력의 경계를 규명하는 이론 및 해석 프로그램의 타당성을 확인하기 위한 실험 장치는 볼트 축에 수직인 방향으로 2개의 전단력을 가하는 방법으로 설계하였다.

실험 장치의 구조는 볼트가 축 방향으로 자유롭게 풀릴 수 있고 중력에 의해 처지지 않도록 지지하는 지지부와 볼트 하우스, 볼트에 전단력을 가하는 액추에이터(actuator), 이를 측정하고 볼트에 전달하는 로드셀(load-cell)과 무두 볼트로 이루어져 있다. Fig. 8은 실험 장치를 구성하는 부품들을 3차원으로 설계한 후 조립한 그림이다. Fig. 8에 표시된 전단력 F_1 과 F_2 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_1 &= A_1 \sin(\omega t) \\ F_2 &= A_2 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A_1 , A_2 는 힘의 진폭을 결정하는 요소이며, ϕ 는 위상, ω 는 진동 주파수이다. 본 실험에서는 두 전단력이 볼트에 동시에 작용하도록 위상을 0으로 설정하고, 진동 주파수를 실제 자동차 주행 중 생기는 주파수와 가장 유사한 주파수인 33Hz로 실험했다.

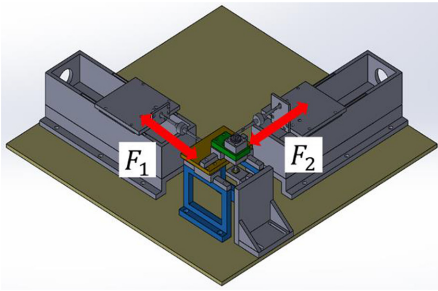


Fig. 8. 3D Drawing of testing machine.

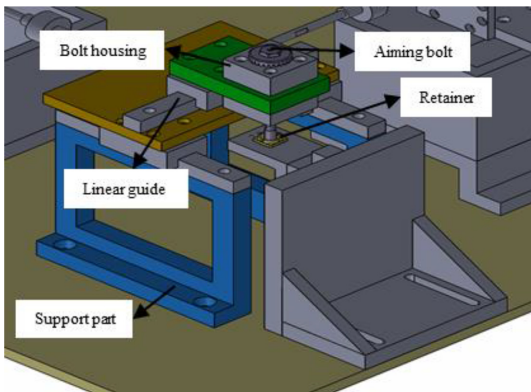


Fig. 9. Detailed device of aiming bolt.

Fig. 9는 지지부와 볼트 하우징의 상세도를 나타낸 그림이다. 리테이너가 볼트로부터 풀리는 것을 보조하기 위해 축 방향으로 1개의 리니어 가이드(linear guide)를 설치했다. 또한 한 평면에서 볼트에 F_1 , F_2 를 높이 차 없이 가했을 때 발생하는 중력 처짐 문제를 해결하고자 2개의 리니어 가이드를 이용하여 이를 보조 부품으로 지지하고 두 힘이 높이 차를 가지면서 동시에 작용할 수 있도록 설계했다.

실제 헤드램프 내에서 에이밍 볼트의 오링과 푸시 너트 사이에 볼트 하우징이 설치되어 있다. 따라서 본 실험에서도 그와 같이 볼트 하우징을 설계하여 리니어 가이드와 결합했다. 볼트 하우징과 F_2 방향 리니어 가이드를 설치하기 위한 평판 각각에 탭을 가공하고 이를 모두 볼트와 결합하는 방법으로 에이밍 볼트에 전단력을 전달했다.

4-2. 실험 조건 및 방법

볼트 풀림 실험 시 측정 또는 선정해야 하는 데이터는 에이밍 볼트와 리테이너 사이의 마찰 토크, 힘의 진

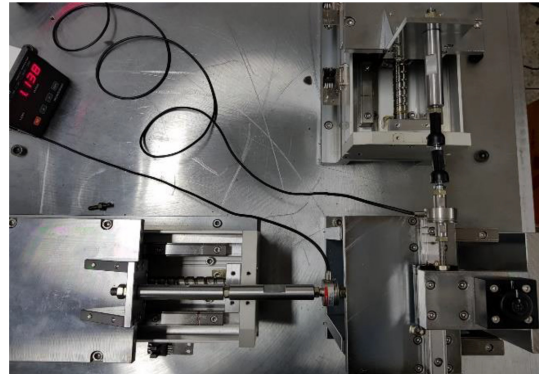


Fig. 10. Photo of assembled testing machine.

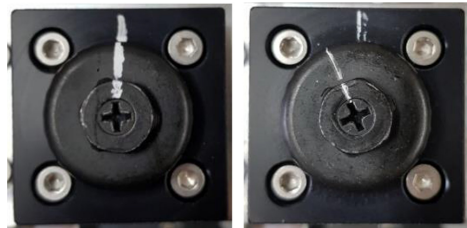


Fig. 11. The way to check self-loosening of aiming bolt.

폭, 볼트에 가해지는 전단력이다. 먼저, 에이밍 볼트와 리테이너 사이의 마찰 토크는 볼트 하우징에 볼트를 조립할 때 푸시 너트를 볼트 하우징에 얼마나 세게 조립하느냐에 따라 달라진다. 본 실험에서 설정한 마찰 토크 범위는 0.3-0.8 N·m로 매 실험마다 다양한 마찰 토크로 볼트를 조립하고 이를 토크 센서(torque sensor)를 이용하여 측정했다.

또한, 매트랩(mathlab)의 시뮬 링크(simul-link)로 볼트에 정해진 시간 동안 끊임없이 힘을 가하도록 제어하는 로직(logic)을 생성했다. 이를 통해 힘의 주파수와 진폭, 시간을 설정할 수 있다. 주파수는 앞서 언급한 대로 33Hz로 고정하고 실험 시간을 8시간으로 설정하여 진폭을 변화시키면서 실험을 진행했다. 본 실험의 신뢰성을 높이기 위해 수치해석 프로그램의 그래프에서 예상할 수 있는 힘의 값을 계산하지 않고 진폭을 랜덤으로 설정하여 블라인드 테스트를 실행했다.

에이밍 볼트에 가해지는 전단력을 로드셀과 인디케이터(indicator)를 이용하여 측정하고 FFT analyzer로 가진 주파수에서의 힘으로 출력하고 이를 2시간마다 측정했다. 이 두 전단력의 합력을 계산하고 기록했다.

볼트 풀림 여부는 Fig. 11과 같이 볼트 하우징과 볼

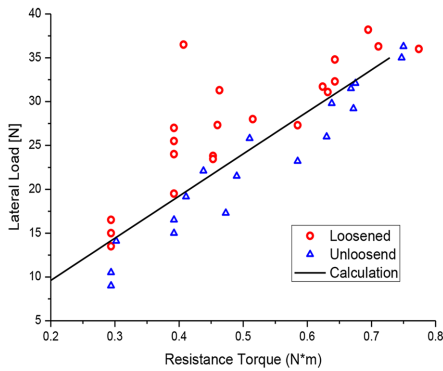


Fig. 12. Comparison between analysis and experiment.

트에 기준선을 그린 후, 실험 중 직선의 이탈 여부를 확인했다. 육안으로 볼트 풀림이 확인되면 실험을 중지했다. 실험에서 사용된 에이밍 볼트는 실험을 진행하면서 전단력에 의한 굽힘이 발생하였을 경우 교체했다. 반면, 리테이너는 매 실험마다 변경했다. Fig. 10은 실험 장치를 설계하여 제작한 후 조립한 사진이다.

5. 수치 해석과 실험 비교

Fig. 12는 수치해석 프로그램에서 이론적으로 도출된 해석값과 실험을 통해 얻은 데이터를 비교한 그래프를 나타낸다. 외력에 의해 에이밍 볼트가 풀리거나 조이는 현상이 나타나지만 본 실험에서 볼트가 조인 경우는 없었다. 따라서 Fig. 12에 표시된 실험 데이터는 모두 풀리거나 풀리지 않은 경우를 나타낸다. 볼트가 풀린 경우를 빨간색 원으로 표시했고, 풀리지 않은 경우는 파란색 삼각형으로 표시했다. Fig. 12에서 볼 수 있는 몇몇 오차들은 실험 장치 조립에 의해 생긴 실험 오차로, 무시할 수 있다.

이를 통해 이론값과 실험 데이터의 경향이 일치함을 확인하였으며, 유도한 이론과 수치 해석 프로그램의 타당성을 확인했다.

6. 결 론

본 연구에서는 자동차 헤드램프 내 에이밍 볼트에 적용되는 풀림 이론을 유도하고 수치 해석 프로그램을 통해 볼트 풀림 경계를 정의했다. 또한, 실험을 통해 이론과 해석 프로그램을 검증했다. 따라서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나사산이 부분적으로 분포하는 플라스틱 너트와 상호 작용하는 볼트가 풀리는 외력을 예측할 수 있다.
2. 개발된 해석 프로그램은 헤드램프의 에이밍 볼트가 풀리지 않도록 설계할 수 있는 방법을 개발하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 (주)SL의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

References

- [1] Sakai, T., "Investigation of bolt loosening mechanism", *Bulletin of the JSME*, Vol.21, No.159, pp.1385-1390, 1978.
- [2] Sato, S., Hosokawa, S., Yamamoto, A., "Studies on loosening mechanism of bolt nut units(2nd Report)-A solution for self-loosening mechanism in the repeated tensile loads", *Bulletin of the JSPE*, Vol.51, No.8, pp.1540-1546, 1985.
- [3] Kasei, S., "A study of self-loosening of bolted joints due to repetition of small amount of slippage at bearing surface", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.1, No.3, pp.358-367, 2007.
- [4] Yokoyama, T., Olsson, M., Izumi, S., Sakai, S., "Investigation into the self-loosening behavior of bolted joint subjected to rotational loading", *Engineering Failure Analysis*, Vol.23, pp.35-43, 2012.
- [5] Koga, K., "The effect of thread angle on loosening by impact (1st report, theoretical analysis)", *Bulletin of the JSME*, Vol.16, No.96, pp.1010-1019, 1973.
- [6] Dinger, G., Friedrich, C., "Avoiding self-loosening failure of bolted joints with numerical assessment of local contact state", *Engineering Failure Analysis* Vol.18, No.8, pp.2188-2200, 2011.
- [7] Koga, K., Isono, H., "Study on self-loosening of bolted joints taking account of characteristics of impulsive friction", *Bulletin of the JSME*, Vol.29, No.249, pp. 1004-1012, 1986.
- [8] Fujioka, Y., Sakai, T., "Rotating loosening mechanism of a nut connecting a rotary disc under rotating-bending force", *Journal of Mechanical Design*, Vol.127, No.6, pp.1191-1197, 2005.
- [9] Kong, Y. S., Kim, T. W., "A study on setting of torque for compressor jointing bolt", *Journal of the KSTLE*, Vol.29, No.5, pp.286-290, 2013, <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2013.29.5.286>