

풀림 방지 너트용 스프링의 형상 최적 설계 Optimum Design of the Shape of the Spring for a Loose-proof Lock Nut

*정성필¹, #박태원², 정원선³, 송현석³

*S. P. Jung¹, #T. W. Park(park@ajou.ac.kr)², W. S. Chung³

¹ 아주대학교 기계공학부 대학원, ² 아주대학교 기계공학부, ³ 자동차 부품 연구원

Key words : Loose-proof Lock Nut, Finite Element Model, Response Surface Analysis Method

1. 서론

일반적인 볼트-너트 체결체에 있어서, 볼트-너트를 조인 후 피 체결물에 볼트의 축 직각방향으로 연속적인 하중을 가하게 되면 너트가 풀린다는 사실이 잘 알려져 있다 [1]. 본 연구에서는 너트내부에 스프링을 삽입하여 볼트와의 결합시 볼트의 축력을 증감으로써 너트의 풀림 현상을 억제시키는 새로운 개념의 풀림 방지 로크 너트(Loose-proof Lock Nut)를 개발하였다. Fig. 1은 로크너트의 구조를 보여준다. 너트 내부의 공간(Retainer)에 스프링이 삽입되어 있고, 스프링의 후크(Hook)부가 너트의 외벽에 구속되어 스프링의 축방향 회전을 구속한다. 스프링의 내경은 볼트의 root diameter 보다 약간 작고, 스프링의 피치는 볼트의 피치보다 약간 크다. 따라서 볼트가 인입될 때 스프링은 반지름 방향으로 팽창되고, 길이방향으로는 압축된다. 한편 볼트가 방출될 때에는 스프링의 복원력에 의해 스프링과 볼트의 나사산 사이의 마찰력과 볼트의 축력이 증대되고, 이는 볼트에 강력한 저항력을 줌으로써 볼트의 회전을 방해한다. 결과적으로 스프링은 볼트의 축력을 증대시키고, 회전을 막음으로써 볼트-너트 결합을 공고히 해 준다. 이러한 로크 너트의 풀림 성능을 확인하기 위해 로크 너트 결합체에 대한 유한 요소 모델(Finite Element Model)을 생성하였고, MSC/Marc 를 이용하여 피 체결물에 축방향 하중을 반복적으로 가했을 때 로크 너트의 풀림 회전량과 볼트의 축력 변화를 살펴보았다. 또한 로크 너트의 풀림 성능을 증대시키기 위하여 반응표면 분석법(Response Surface Analysis Method)[2]을 이용하여 최적의 스프링 형상을 찾아냈다.

2. 유한 요소 해석 모델 검증

로크 너트는 내부에 삽입된 스프링의 재질 및 형상에 따라 풀림특성이 결정된다. 로크너트의 풀림 성능을 정확하게 예측하기 위하여 스프링에 대한 압축 실험을 진행하였고, 해석결과를 실험 결과와 비교해 봄으로써 스프링 모델의 신뢰성을 확보하였다. Fig.2는 스프링의 인장/압축 실험 모습을 보여준다. 스프링 압축시 나타나는 좌굴현상을 방지하기 위하여 Fig.2의 오른쪽 그림에서 볼 수 있는 것과 같은 지그를 제작하여, 스프링을 지그안에 삽입한 후 압축시켰다. 스프링 변위가 각각 1mm, 2mm 일 때 발생하는 스프링 반발력을 측정하였다. Fig.3은 해석 결과를 보여준다. 스프링 모델의 위/아래에 강체 평면을 생성한 후, 아래쪽의 평면은 고정시키고, 위쪽의 평면은 1mm 와 2mm 의 강제 변위를 가했다. 스프링은 아래쪽 평면과 만나는 지점에 위치한 노드의 6 방향 변위를 구속한 다음 윗쪽 강체평면과 스프링 모델 사이에 생기는 수직방향 접촉력(Contact normal force)를 측정하였다. Table 1은 스프링 변위에 따른 하중 측정의 실험 결과와 해석 결과를 보여준다. 표에서 볼 수 있듯이 실험 결과와 해석 결과의 오차가 약 1% 내외로 스프링 모델이 매우 신뢰성 있음을 알 수 있다.

Fig.4는 볼트, 너트, 스프링 그리고 진동판에 대한 유한 요소 모델과 해석 조건을 보여준다. 볼트는 M12 x P1.75의 표준 규격이고, 너트와 스프링은 본 연구에서 개발한 제품을 각각 사용하였다. 볼트와 너트의 나사산 사이, 볼트의 나사산과 스프링 사이, 진동판과 볼트의 접촉면, 진동판과 너트의 접촉면에 접촉 조건을 부여하였고, 마찰계수는 0.1

로 설정하였다. 이는 볼트를 체결할 때 마찰을 일정하게 제어하는 경우(윤활유를 이용한 경우)의 대표적인 값이다 [1]. 일반적인 볼트-너트 체결물에서 볼트에 걸리는 하중을 5kN 이라 가정하고, 5kN의 초기 축력 발생을 위해 볼트 하단면에 Y 방향 강제 변위를 -0.1mm 부여하였다. 진동판 측면에 0.35mm의 X 방향으로 강제 변위를 5 사이클 부여함으로써 볼트에 대한 축직각 방향으로의 하중을 발생시켰다. 너트는 축 둘레 회전만이 가능하게 설정하였다. 볼트는 머리부 위면을 완전 고정 시켰고, 스프링은 길이방향 인장만이 가능하게 설정 하였다. Table 2는 유한 요소 모델의 물성치를 보여준다. 볼트와 너트는 일반적으로 많이 사용되는 탄소 공구강을 사용하였다. 스프링 요소의 물성치는 앞선 실험결과와의 비교를 통해 산출하였다. 피체결물인 Plate는 steel로 설정 하였다. Fig.5는 유한요소 해석 결과를 보여준다. Plate의 움직임에 따라 너트가 회전하고 있고, 따라서 볼트에 축직각 방향 진동을 가했을 때 너트가 회전하는 현상이 성공적으로 구현되었음을 알 수 있다.

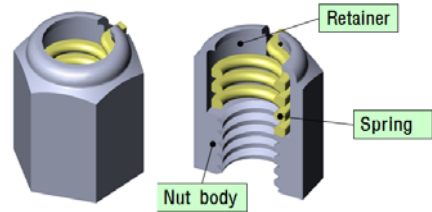


Fig. 1 Structure of the lock nut



Fig. 2 Experiment device for spring compression

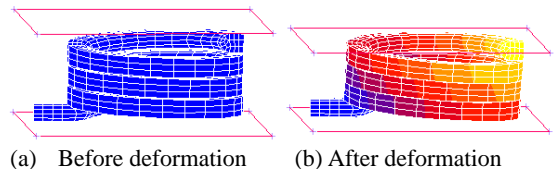


Fig. 3 Spring model analysis result

Table 1 Result comparison of the experiment and simulation of the spring model

Compression (mm)	Load (N)		Error (%)
	Experiment	Simulation	
1	7.0217	7.046	0.35
2	13.8327	13.685	1.07

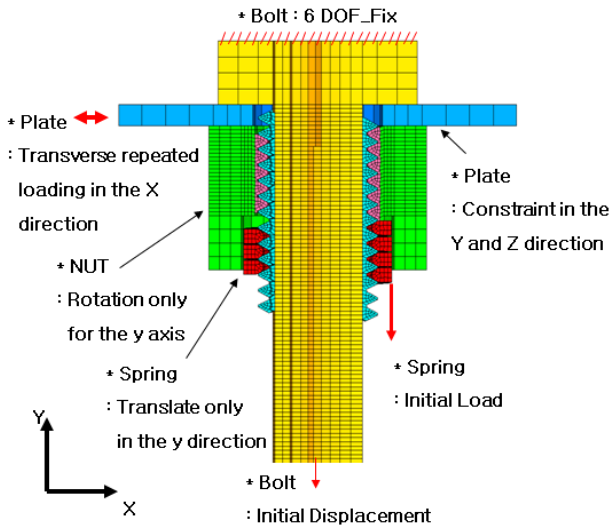


Fig. 4 Finite element model of the lock nut assembly

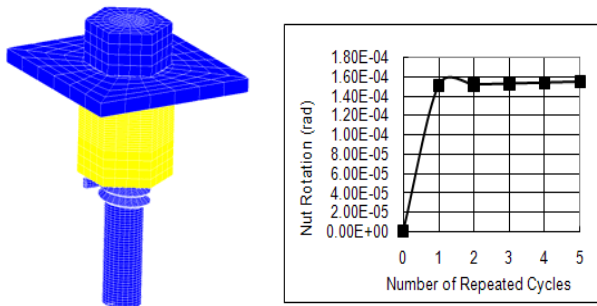


Fig. 5 Simulation result on Nut rotation

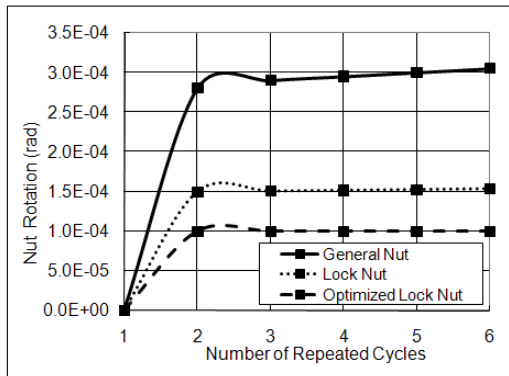


Fig. 6 Optimization verification of the lock nut

Table 2 Material properties of the models

Component	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density
Bolt	205 GPa	0.29	7870 kg/m ³
Nut	205 GPa	0.29	7870 kg/m ³
Spring	207 GPa	0.3	7600 kg/m ³
Plate	210 GPa	0.3	7850 kg/m ³

Table 3 Design parameters for the spring optimization

Design Parameters	Level		
	-1	0	1
L1	1.8	2.2	2.6
L2	14	14.5	15
r	0.725	0.8	0.875
d	1.15	1.2	1.25

3. 최적화

로크너트의 풀림성능을 향상시키기 위한 스프링의 최적 형상을 찾기 위하여 외력에 따른 볼트의 회전량 변화를 최소화하는 것을 목적함수로 선정하였다. 설계변수는 스프링의 피치길이(L1), 스프링의 외경(L2), 스프링 단면의 반경(r) 및 스프링 단면의 길이(d)로 설정하였다. Table 3은 설계 변수들의 수준에 따른 값을 보여주며, 각 수준에 해당하는 설계 변수들의 값은 공학적 토론(Engineering discussion)을 거쳐 산출하였다. 최적화를 위한 목적함수를 도출하기 위하여 중심합성 실험계획법에 따른 반응표면 분석법을 이용하였다. 설계 변수가 4 개이므로 총 25 회의 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 이용하여 2 차의 다항 회귀 모형 함수를 도출하였다. 도출된 모형함수는 분산 분석표(ANOVA table)를 이용하여 그 신뢰성을 검증하였으며, 추정된 모형함수를 최소화 시키는 설계 변수들의 최적값을 찾아내기 위해 Sequential Quadratic Programming(SQP) 방법 [3]을 이용하였다. 최적화 결과를 검증하기 위하여 최적화 이전과 이후의 스프링을 장착한 모델의 성능을 비교하였다. 또한 너트의 풀림을 방지하는데 있어서 스프링의 효과를 확인하기 위해 볼트-로크너트 체결체와 볼트-일반너트 체결체의 성능을 비교하였다. Fig.6은 너트의 회전량 변화를 보여준다. 가로축은 축 직각방향 하중의 반복횟수, 세로축은 너트의 풀림 회전량을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 스프링을 장착한 체결체가 일반 체결체보다 하중의 반복에 따라 증가되는 너트 회전량의 크기가 훨씬 적다. 또, 최적화된 스프링을 장착하면 너트의 회전량 변화가 최소가 됨을 알 수 있다. 따라서 스프링을 장착한 볼트-너트 체결체가 일반 볼트-너트 체결체보다 외력에 따른 너트 풀림의 가능성이 훨씬 적다고 판단할 수 있고, 최적화된 스프링을 장착하였을 때 너트의 풀림이 가장 작으므로 실험 계획법을 이용한 최적화가 잘 진행되었다고 결론 내릴 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 볼트-너트 체결체에 있어서 너트의 풀림을 방지하기 위하여 너트 내부에 스프링을 삽입하여 볼트의 축하중을 증대시킨 새로운 형태의 너트를 개발하였다. 성능을 확인하기 위해 각각의 부품에 대한 유한 요소 모델을 생성하였고, 볼트-너트 체결체에 축 직각 방향 하중을 반복적으로 가했을 때 볼트의 축력 변화와 너트의 회전량 변화를 알아보았다. 또한 반응표면 분석법을 이용하여 스프링의 최적 형상을 찾았다. 본 연구에서 개발한 너트의 성능을 검증하기 위하여 스프링을 장착하지 않은 볼트-너트 체결체와 스프링을 장착한 볼트-너트 체결체에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 스프링을 장착한 경우, 장착하지 않았을 때보다 너트의 풀림량이 훨씬 적다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 너트를 활용하면, 일반 너트보다 진동 및 충격에 대하여 너트의 풀림량이 훨씬 적기 때문에 생산 공장, 구조물, 교량, 철도등 여러 산업 분야에서 광범위하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Sawa, T. and Shoji, Y., "Analytical Research on Mechanism of Bolt Loosening due to Lateral Loads", Hard Lock Technical Reports, 2006.
2. Jung, S., Park, T., "An optimum design of a Gas Circuit Breaker using Design of Experiments", Mechanics Based Design of Structures and Machines, 36, pp.346-363, 2008.
3. Vanderplaats, N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications", McGraw-Hill, San Francisco, 1984.