

나사 풀림 방지를 위한 삽입 부품의 설계 최적화

박상근*

¹한국교통대학교 기계공학과

An Optimization Design of the Insertion Part for Preventing the Screw Thread from Loosening

Sangkun Park^{1*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 본 연구는 볼트강도등급 10.9에 의해 추천되는 조임 토크 640~800(Nm)가 볼트-너트 체결체에 가해졌을 때 풀림 방지를 위한 코일 스프링의 삽입 및 시뮬레이션 기반 설계 최적화에 관한 것이다. 먼저 볼트-너트-코일스프링으로 구성된 조립체에 대하여 등가응력에 기반을 둔 구조 안전성 판단을 위한 조립체 구조해석 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 이러한 해석 시뮬레이션 결과로부터 설계 개선안 도출을 위한 설계전략을 수립한다. 또한 이 전략 안에서 기존 설계의 성능을 개선해 나가는 반복 과정을 제한한다. 이 과정에서는 먼저 반응표면법을 사용하여 설계 파라미터 후보점을 찾고, 그 후보점의 반응값과 실제 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 설계 후보점(코일스프링 감감수 $N = 6$)이 최적인지를 검증한다.

Abstract This study deals the optimization design with the simulation based design of a coil spring inserted into the lock nut for preventing the screw thread from loosening at the bolted joint when the high-strength steel bolt with the property class of 10.9 is used and the screw torque of 640 to 800 (Nm) is applied. In this study, structural analysis of assembly composed of bolt, nut and coil spring is carried out to evaluate its safety factors on the basis of the equivalent stress with commercial finite element analysis software. And the design strategy to extract the design improvement from these simulation results is established. An iterative process performed with the proposed design strategy is also proposed for improving the performance of the existing design. At the proposed procedure, the feasible design parameters using response surface method are found, and then these parameters are verified to be optimal or not by comparing with the response values and the simulation results obtained from the feasible parameters.

Key Words : Coil Spring, Loose-proof Nut, Simulation Based Optimization, Structural Analysis

1. 서론

볼트와 너트는 각종 기기와 구조물을 체결 시 사용되는 체결 요소로서 비교적 저렴한 비용으로 체결을 구현할 수 있는 효율적인 요소이다. 그러나 체결 후 볼트에 축의 수직 방향으로 반복 하중이 가해지면 나사가 풀리게 된다[1]. 이러한 풀림 현상은 자동차 및 생산 설비 등 주로 진동이 발생하는 시스템에서 매우 빈번하게 발생하는 현상으로 볼트-너트 결합체는 이러한 풀림 현상에 의

한 위험이 항상 존재한다. 이러한 풀림 현상의 메커니즘을 규명한 선행 연구로서 Izumi[2]와 Zhang[3] 등이 있는데 이들은 주로 실험 및 유한요소 해석을 통하여 이론적으로 풀림 현상을 설명하였다.

한편 풀림 방지를 위한 다양한 방식들이 개발되어 왔는데 대표적으로 톱니형 볼트와 와셔를 사용하는 방법이다. 이는 톱니의 풀림 반발력을 이용한 방식으로 연성 재료는 강하게 체결되나 정밀도가 다소 떨어진다는 단점이 있다. 최근 들어 너트에 풀림 방지 기능을 강화한 다양한

*Corresponding Author : Sangkun Park (Korea National Univ. of Transportation)

Tel: +82-43-841-5122 email: skpark@ut.ac.kr

Received December 11, 2014

Revised February 11, 2014

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

풀림 방지 너트들이 개발되어 판매되고 있다. 대표적으로 WINDSOR사에서 개발한 NYLOCK가 있는데 너트 내부 공간에 고무 패킹을 삽입한 형태로 볼트와 고무 패킹 간의 마찰력에 의해 풀림을 방지하려는 제품으로서 고무를 사용하기 때문에 열 변화에 취약하고 장기간 사용시 소성 변형으로 재사용이 불가능 하다는 단점이 있다. 그리고 일본에서 개발된 HARD LOCK이란 제품은 두 개의 편심을 가진 너트에 볼트를 체결함으로써 볼트의 축력을 향상시켜 풀림을 방지하려는 제품으로서 제조상 조립공정이 힘들고 너트에서 테이퍼진 부분이 취약하다는 단점이 있다. 이밖에 NORD LOCK 및 VIBROCK은 위의 대표적 풀림방지 제품에 비해 상대적으로 체결력이 떨어지며 진동 내구 성능도 취약하다는 단점을 가지고 있다.

한편 국내에서도 활발히 연구 개발[4]되고 있는 풀림 방지 너트로서 스프링을 삽입한 풀림 방지용 로크너트(lock nut)가 있다. 이 로크너트는 너트 내부에 스프링을 장착하고 있는데 볼트와 스프링이 체결을 통하여 볼트 축력을 증대시켜 볼트와 너트 간의 결합력(체결력)을 증대시키려는 제품이다. 본 연구는 현재 주목 받고 있는 로크너트 구조를 가진 스프링이 삽입된 너트 구조물에 관해 구조적 안전성 증대를 위하여 구조해석 시뮬레이션을 통하여 너트 내부에 장착된 스프링의 최적 형상을 설계하는 것이다. ANSYS Workbench을 이용하여 구조해석을 수행하며 설계 최적화를 위한 설계 개선 과정을 제안한다.

2. CAD모델링 및 구조해석

본 연구의 궁극적 목표는 볼트-너트 체결 체의 풀림 방지를 위한 특수 목적의 나사 풀림 구조물을 설계하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위한 첫 번째 시도로서, 여러 가지 방안을 연구 개발 중에 있으나, (주)임진에스티에서 제안한 코일 스프링 방식의 풀림 방지 메카니즘을 본 연구 모델의 기본 개념(방향)으로 설정하고자 한다. 먼저 (주)임진에스티에서 생산 중에 있는 볼트, 너트, 및 풀림 방지 스프링을 모델링하고, 최악의 사용 환경을 고려한 해석 조건을 설정한 후, 이를 ANSYS소프트웨어를 사용하여 구조해석 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 이 결과를 바탕으로 설계 개선에 필요한 설계 파라미터를 선정하고, 이 파라미터의 변화에 따른 응력분포 및 안전

성 여부를 판단한다. 이러한 평가 결과에 기반하여 최적의 설계 파라미터를 탐색하고 최종적으로 설계 개선안을 도출하고자 한다.

본 연구에서 선정된 풀림 방지 너트 및 볼트는 Fig. 1과 같다. 풀림 방지 부품으로 선정된 코일 스프링을 너트 하부 공간에 삽입하고 M22 × 2.5PICH 형식의 볼트를 체결한다. 이때 본 연구에서 사용된 볼트의 강도등급이 10.9이며 허용되는 조임 토크는 640 ~ 800(Nm)이다. 해석 시뮬레이션은 체결된 상태에서 풀림 회전력이 가해졌을 때의 상황을 계산한다. 최악의 해석 조건을 설정하기 위해 가해지는 조임 토크는 최대 허용 값인 800(Nm)을 사용하며, 부품 간 접촉면에서의 마찰력은 가능한 한 최소값으로 설정하여 풀림 여부를 확인한다.

해석 시 사용된 해석 모델의 요소는 비구조화 육면체 요소를 사용한다. 단, 나사 산이 존재하는 영역은 형상 복잡성으로 인해 사면체 요소를 사용한다. 또한 효율적인 시뮬레이션 수행을 위해 메쉬 크기와 그 분포를 조정할 수 있으나, 본 연구에서는 ANSYS 소프트웨어에서 제공하는 자동 메쉬 생성 기능을 사용하여 해석을 수행하였다. 그리고 해석 결과는 계산된 등가응력(equivalent stress)의 분포를 가시화 함으로써 확인하며, 안전성 여부 및 그 크기는 안전계수 분포를 통하여 판단한다.

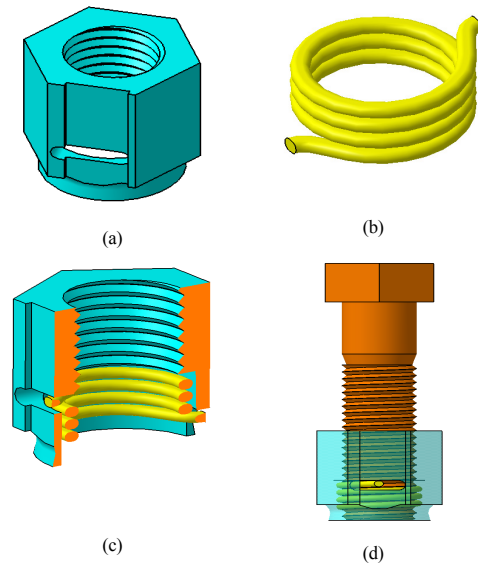


Fig. 1. Parts and assembly used in this paper, where the coil spring structure is proposed for preventing loosening (a) nut (b) coil spring (proposed) (c) nut & coil spring (d) assembly composed of three parts

2.1 물성조건 및 경계조건

본 연구에서 사용된 각 부품의 재질은 아래와 같으며, 이를 기반으로 구조해석 시뮬레이션을 위해 설정한 물성 자료는 Table 1과 같다.

- 주어진 각 부품의 재질
 - ▶ 볼트(M22 × 2.5PICH)의 재질: **SWRCH51B20** (강도구분 10.9)
 - ▶ 너트의 재질: **S45C** (여기서 강도구분 10으로 가정)
 - ▶ 코일 스프링 재질: **spring강 62카본**

Table 1. Material conditions used in CAE simulation.

Part	Material Property	Property Values
bolt	▶Young's Modulus (MPa)	2.05e+005
	▶Poisson's Ratio	0.29
	▶Tensile Yield Strength (MPa)	1005
	▶Tensile Ultimate Strength(MPa)	1145
nut	▶Young's Modulus (MPa)	2.05e+005
	▶Poisson's Ratio	0.29
	▶Tensile Yield Strength (MPa)	343
	▶Tensile Ultimate Strength(MPa)	569
spring	▶Young's Modulus (MPa)	2.05e+005
	▶Poisson's Ratio	0.29
	▶Tensile Yield Strength (MPa)	1070
	▶Tensile Ultimate Strength(MPa)	1170

○ 수직방향의 인장력 (Fig. 2 (a)에서 B면에 적용) 체결 시 작용하는 조임토크 800(Nm)을 축 방향으로 작용하는 수직력으로 변환하여 적용한다. 이때 사용된 토크와 수직력 간의 관계식은 다음과 같다.

$$T = Q \left\{ \frac{d}{2} \times \tan(\alpha + \rho') + 1.4 \times \frac{d}{2} \times \mu \right\}$$

여기서 T 는 토크, Q 는 수직력, α 는 리드각, ρ' 는 마찰각, d 는 유효지름, 그리고 μ 는 마찰계수를 의미한다. 본 연구에서 사용된 나사 모델의 해당하는 파라미터 값들을 위의 식에 대입하면, 볼트에 작용하는 수직력은 $Q = 2578.2(N)$ 가 됨을 확인할 수 있다.

○ 고정 구속조건 (Fig. 2 (a)에서 A면에 적용)

위에서 설명한 수직방향의 인장력 Q 를 적용할 때, 너트의 상부 면을 고정시킨다. 이것은 볼트와 너트 사이에서 가상의 물체가 존재함을 가정하였을 때의 경우로서, 실제 물체를 삽입하여 해석하지 않아도 그 해석 결과는 큰 차이가 없으므로 계산 효율성 측면에서 너트 상부 면에

고정 조건을 설정한 것이다.

○ 코일 스프링의 경계 조건

다음의 3가지 경계조건이 부여된다. 즉,

- 1) 코일 스프링 양쪽 끝단 면에 고정 조건 설정 (Fig. 2 (b)에서 A면)
- 2) 코일 스프링 상부 쪽의 특정 면(너트 하부 구멍과 스프링이 접촉하는 면)에 축 방향 변위 고정 조건 설정 (Fig. 2 (b)에서 C면)
- 3) 코일 스프링 안쪽 면(볼트와 스프링이 접촉하는 면)에 마찰력이 존재하므로 강제 풀림 하중으로서 회전력 설정 (Fig. 2 (b)에서 B면): 여기서 회전력 값 9.375(Nmm)을 구하기 위해 볼트와 스프링 간의 접촉 압력을 먼저 해석한 후, 그 값에 마찰계수를 곱하여 회전력을 계산하였다.

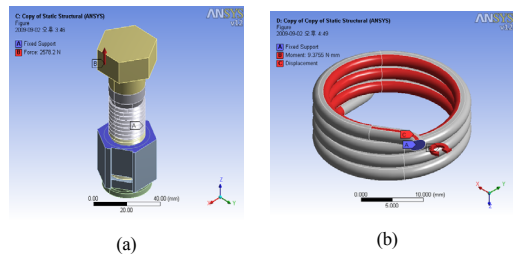


Fig. 2. Loading and constraint conditions (a) tensile force and fixed support (b) tensile force and fixed support

○ 볼트와 너트 사이의 접촉 조건 (Fig. 3 (a))

볼트와 너트 사이에 미끄러짐 마찰계수 $\mu = 0.12$ 를 사용한다. 일반적으로 추천되는 마찰계수 0.11 ~ 0.19에서 비교적 작은 값인 0.12 값을 선택한 것이다. 이것은 최대한 작은 풀림력에 의해서도 풀림이 발생할 수 있도록 최악의 조건을 부여하기 위함이다. 마찰계수에 따라 그 해석 결과가 다르기 때문에 매우 신중한 선정이 필요하다. 그러나 본 연구의 경우는 그 민감도가 크지 않은 것으로 관측되었다.

○ 볼트와 스프링 사이의 접촉 조건 (Fig. 3 (b))

코일 스프링의 조임력에 의하여 볼트와 스프링 간의 접촉 면에 억지끼움 조건을 적용한다. 이 접촉 조건은 미끄러짐이 없음을 가정한 조건으로서 볼트와 너트 간 풀림 상황에서 코일 스프링은 볼트를 더욱 조이기 때문에 미끄러짐 없음 가정은 적절한 설정이라 판단된다.

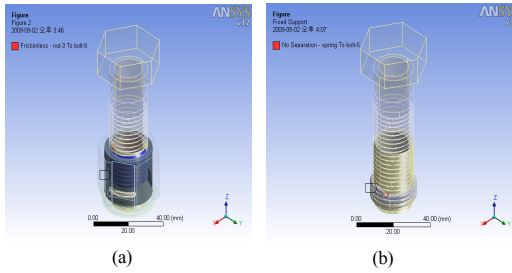


Fig. 3. Contact conditions between bolt, nut and spring part. (a) frictional fit between bolt and nut (b) interference fit between bolt and spring

2.2 해석모델 생성 및 시뮬레이션

본 연구에서 사용한 구조해석 소프트웨어는 ANSYS Workbench V.12이며, 이 소프트웨어를 사용하여 생성한 해석모델은 Fig. 4와 같다. 그리고 위에서 언급한 경계 조건 및 접촉 조건을 적용하여 계산된 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 이 그림은 각 부품에서 발생된 등가 응력 분포를 보여주고 있는데, 이로부터 이들 응력 값들 중에서 최대응력 발생지점과 해당하는 최대 값을 확인할 수 있다. 볼트의 경우에 최대 응력 값은 130(MPa)이며 그 위치는 너트 상부 쪽의 볼트 나사산 표면 근방이고, 너트의 경우에 최대 응력 값은 32.5(MPa)이며 그 위치는 너트 상부 쪽 나사산 표면 근방이다. 그리고 코일 스프링의 경우에 최대 값은 8.7(MPa)이며 그 위치는 너트 구멍과 스프링이 접촉하는 면 근방이다. 여기서 각 부품의 응력 최대값은 각 부품의 항복강도에 비해 매우 낮기 때문에 파손될 확률이 희박함을 확인할 수 있다.

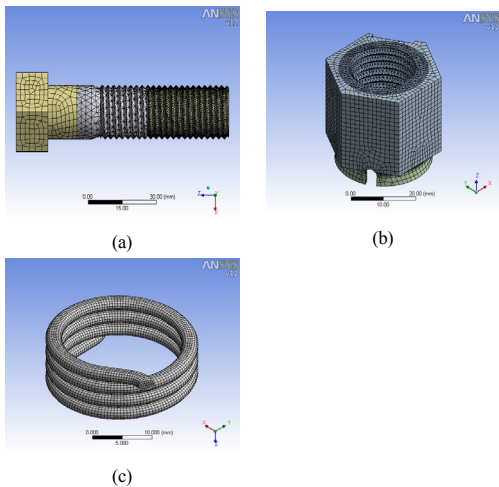


Fig. 4. Finite element analysis model (a) bolt (b) nut (c) coil spring

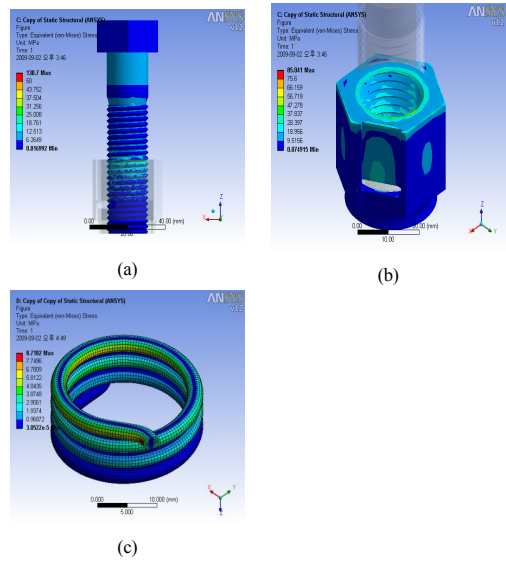


Fig. 5. Equivalent stress distribution

(a) bolt ($\sigma_{max} = 130$ MPa) (b) nut ($\sigma_{max} = 32.5$ MPa) (c) coil spring ($\sigma_{max} = 8.7$ MPa)

2.3 안전성 평가

너트 혹은 볼트의 강도 등급에 의해 추천되고 있는 허용 토크 중 최대 값인 800 (Nm)를 가했을 때, 볼트, 너트, 및 코일 스프링의 구조적 안전성 여부를 판단한다. 재료 파손예측이론 중에 가장 일반적으로 사용되는 전단 변형 에너지 가설(distortion energy theory: von-Mises criteria)에 기반하여 구조 안전성 및 그 수준(정도)을 판단하기 위해 다음과 같은 안전 계수(safety factor)를 계산한다.

$$S_F = Y / \sigma_{max}$$

여기서 σ_{max} 는 발생된 최대 등가응력을 말하며 Y 는 재료의 항복강도이다. 본 연구 시뮬레이션 결과(등가응력 분포)를 바탕으로 각 부품의 구조적 안전성은 다음과 같이 평가한다. 이 방식은 산업 현장에서 일반적으로 사용되는 방식과 그 의미가 같다.

○ 볼트의 경우

$\sigma_{max} (= 130 \text{ MPa}) < Y (= 1,005 \text{ MPa})$ 이므로 볼트는 주어진 최대 조임 토크(800Nm)에 대해 구조적으로 안전하다. (여기서 안전계수는 $S_F = 7.7$ 이다.)

○ 너트의 경우

$\sigma_{max} (= 32.5 \text{ MPa}) < Y (= 343 \text{ MPa})$ 이므로 너트는 주어진 최대 조임 토크(800Nm)에 대해 구조적으로 안전하다. (여기서 안전계수는 $S_F = 10.6$ 이다.)

○ 코일 스프링의 경우

$\sigma_{max} (= 8.7 \text{ MPa}) < Y (= 1,070 \text{ MPa})$ 이므로 스프링은 주어진 최대 조임 토크(800Nm)에 대해 구조적으로 안전하다. (여기서 안전계수는 $S_F = 122.7$ 이다.)

3. 설계 개선

본 연구에서 제안한 설계 개선안 도출 과정을 살펴보면 다음과 같은 11개의 과정으로 요약할 수 있다. Step 1~3은 일반적인 2장에서 설명한 과정이며, Step 4~5는 설계 개선을 위한 전략 수립 과정이다. 그리고 Step 6~11은 전략에 따라 설계를 개선해 나가는 반복 과정을 나타낸다.

○ 본 연구에서 수행한 설계 개선 과정

Step 1: 볼트-너트-코일스프링으로 구성된 조립체 모델을 생성한다.

Step 2: 주어진 해석조건(물성조건, 경계조건, 접촉조건 등)을 입력하여 구조해석 시뮬레이션을 수행한다.

Step 3: 등가응력 및 안전계수 분포를 계산하여 구조적 안전성 및 그 수준을 평가한다.

Step 4: 조립체가 가지는 구조적 문제점의 원인을 파악하며 이를 개선하기 위한 설계 파라미터를 선정한다. 그리고 선정된 파라미터는 그 변화를 통하여 목표성능이 최대가 되는 최적의 값을 아래 과정에 의해 탐색한다. (여기서 본 연구 설계 목표는 최대 등가응력의 최소화이며, 이때 만족되어야 할 제한 조건은 볼트와 너트의 규격치수 변경 불가이다.)

Step 5: 설계 파라미터가 존재할 수 있는 허용 범위를 선정하고, 이 범위 안에서 복수 개의 파라미터 값을 결정한다. (여기서 실험계획법 및 샘플링 알고리즘 등을 사용하여 그 값을 선정할 수 있으나 본 연구 수행의 작업 복잡성을 제

거하기 위해 임의의 3점을 선택하였다.)

Step 6: 각 파라미터 값에 해당하는 조립체를 재설계한다.

Step 7: 변경된 각 조립체에 관하여 Step 1 ~ Step 3의 작업을 수행한다.

Step 8: 각 시뮬레이션 결과로부터 목적함수(목표성능) 값을 추출한다. (본 연구의 목적함수는 최대 등가응력이다.)

Step 9: 설계 파라미터와 목적함수 값을 기반으로 근사 최적화 기법을 사용하여 근사 최적 값을 계산한다. (근사 최적화 기법으로 반응표면법(response surface method)[5], 공간매핑법(space mapping technique)[6], 다양체 매핑법(manifold mapping technique)[7], 신뢰영역 모델관리 전략(trust-region based model management strategy)[8] 등이 있다. 본 연구에서는 작업의 편의성을 위해 최소자승 근사법을 활용한 근사 방식으로 근사 최적 값을 계산한다.)

Step 10: 근사 최적 값에 해당하는 목적함수의 실제 값과 근사 최적화에 사용되었던 근사함수의 예측 값을 비교한다. 즉 실제 값과 예측 값 사이의 상대 오차를 계산한다.

Step 11: 오차가 주어진 공차보다 작으면 종료하며, 그렇지 않으면 Step 6으로 간다.

3.1 설계 파라미터 선정 및 변화

위에서 소개한 설계 개선 과정에 의하여 볼트-너트-코일스프링으로 구성된 조립체의 최적 설계 안을 ANSYS 기반의 해석 시뮬레이션을 통하여 도출하였다. 설계 개선 과정 중 가장 힘든 작업 영역인 설계 파라미터의 선정 및 그 변화 수준에 관한 부분을 기술하면 다음과 같다.

3.1.1 설계 개선을 위한 파라미터로서 코일 스프링의 감김수(N) 선정

코일 스프링의 형상을 정의하는 파라미터로서 다음의 것들을 고려할 수 있다.

- 1) 소선의 지름: 스프링 재료의 지름
- 2) 평균지름: 바깥지름과 안지름의 평균

- 3) 피치: 길이 방향으로 소선의 중심 간 거리
- 4) 자유길이: 힘이 작용하지 않은 상태에서 스프링의 총 길이
- 5) 총감김수: 소선의 총 감김수

이상의 파라미터 가운데 다수 개의 파라미터를 선정할 수 있으나, 감김수 1개만을 설계 파라미터로 선정하였다. 1개를 선정한 이유는 관련 업체의 요청사항으로서 코일 스프링의 형상 변화가 적어야 제조 상 고려해야 할 작업 비용이 최소화되기 때문이다. 그리고 감김수를 선정한 이유는 다른 파라미터에 비해 해석 결과에 미치는 영향도가 비교적 크며 또한 제조 측면에서 감김수 변화가 비교적 적은 비용으로 처리될 수 있기 때문이다.

3.1.2 코일 스프링의 감김수 변화 수준 결정

가능한 많은 경우의 수 시뮬레이션을 통하여 보다 정밀한 근사 해를 찾을 수 있다. 그러나 이는 많은 계산 비용을 요구하기 때문에 항상 근사 정밀도와 계산 효율성은 상호 충돌하게 된다. 본 연구의 경우도 마찬가지이다. 본 연구에서는 1회 시뮬레이션하는데 많은 시간이 소요되고 또한 설계 공간 상의 목적함수가 연속이며 그 변화 또한 심하지 않기 때문에 계산 효율성 측면에 높은 가중치를 두었다. 즉 경우의 수를 최소화하기 위해 3점을 선택하였고 그 위치는 임의로 선정하였다. (참고로 본 연구에서 사용한 근사곡선은 2차 곡선이다.) 결국 감김수 N의 변화는 N = 2, 4, 6으로 선정하였고 이에 따라 조립체를 재설계하였다.

3.2 설계 파라미터 변화에 따른 구조해석

코일 스프링 감김수(N) 변화 N = 2, 4, 6에 따른 구조해석 시뮬레이션 결과는 Fig. 6~7과 같다. Fig. 6은 감김수 대비 등가응력 분포로서 그림에서 보는 바와 같이 N의 변화에 대해 스프링에 발생된 등가응력이 전반적으로 유사함을 확인할 수 있다. 이는 N이 클수록 스프링과 볼트의 접촉면이 커지며 그 만큼 볼트 축력이 증가하여 볼트와 너트 간의 결합력이 증가함을 보여주는 것이다. Fig. 7은 감김수 대비 안전계수 분포를 나타낸 그림으로 N의 변화에 대해 전반적으로 안전 수준이 유사함을 확인할 수 있다.

위의 해석 결과로부터 감김수와 최대 등가응력 간의 근사 곡선을 그려보면 Fig. 8과 같고, 감김수 대비 최소

안전계수 값 근사 곡선은 Fig. 9와 같다. 여기서 근사 곡선이란 근사 목적함수를 의미한다. 즉 실제적인 목적함수가 아닌 샘플 점에 기반한 목적함수 예측함수인 것이다.

Fig. 8과 9에서 보는 바와 같이 N = 6일 때 최대 등가응력 값이 최소이며, 최소 안전계수 값은 최대이다. 이것은 Fig. 6에서 설명한 바와 같이 볼트 축력이 증가했음에도 불구하고 응력 최대값은 오히려 작아짐을 나타낸 것으로 N = 6일 때 응력 분포가 균일함을 보여주는 것이다.

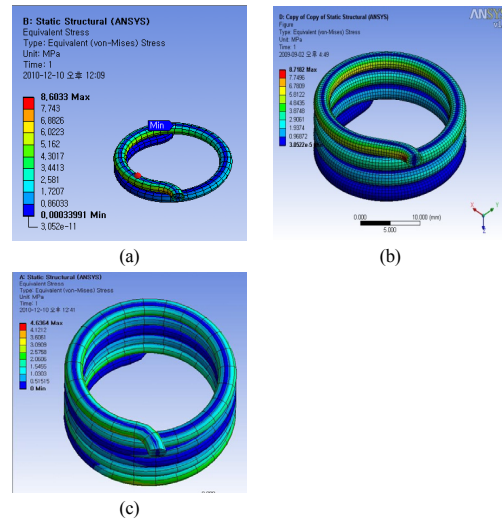


Fig. 6. Comparisons of the equivalent stress distribution (a) N = 2 (b) N = 4 (c) N = 6

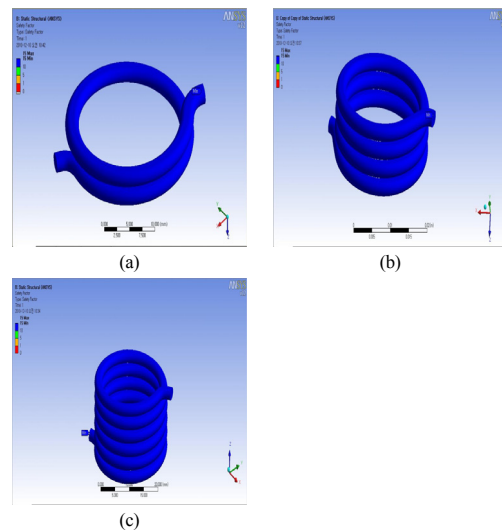


Fig. 7. Comparisons of the safety factor distribution (a) N = 2 (b) N = 4 (c) N = 6

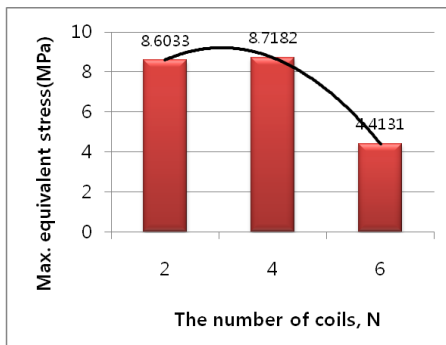


Fig. 8. Plot of the maximum equivalent stress versus the number of coils

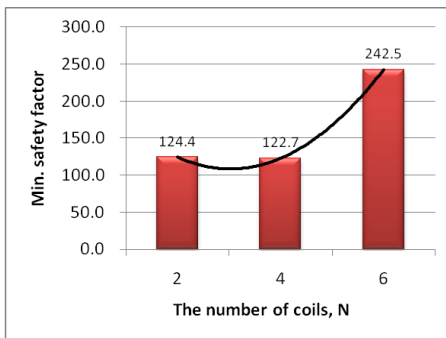


Fig. 9. Plot of the minimum safety factor versus the number of coils

4. 결론

본 연구는 볼트강도등급 10.9에 의해 추천되는 조임 토크 640~800(Nm)가 볼트-너트 체결체에 가해졌을 때 풀림 방지를 위한 코일 스프링의 삽입 및 설계 파라미터 선정에 관한 것으로서, 1) 먼저 볼트-너트-코일스프링 조립체의 구조 해석 시뮬레이션을 수행하였고, 2) 그 결과를 토대로 최적의 코일 스프링을 설계하였다. 그리고 3) 상기 설계를 위한 순차적인 설계 개선 과정을 3절에서 제안하였고, 4) 이 과정에 의해 도출된 최종 시뮬레이션 결과를 Fig. 8과 9와 같이 제시하였고, 이로부터 N = 6 일 때 최대 등가응력 값이 최소이며 최소 안전계수 값은 최대임을 확인할 수 있었다.

비록 관련 업체의 제조상의 이유로 설계 변경 파라미터 선정 및 그 변화 정도에 상당한 제약을 받아 많은 개수의 설계 파라미터를 선정치 못하였으나, 제시된 설계 개선 과정은 설계 파라미터의 개수에 의존하지 않기 때

문에 설계 최적화 측면에서 그 의미를 가진다고 판단할 수 있다.

추후 연구로서 다수의 설계 파라미터의 선정 및 그 변화에 관한 고찰이 필요하며, 본 연구에서 상세히 다루지 못했던 선정된 설계 파라미터의 샘플링 전략(샘플점의 위치와 개수)[9]에 관한 추가 연구가 필요하다. 더불어 반응표면 생성을 위한 근사 최적화 기법[10]에 관한 개발이 필요하다.

References

- [1] T. Sawa, Y. Shoji, "Analytical Research on Mechanism of Bolt Loosening due to Lateral Loads", *Hard Lock Technical Reports*, 2006.
- [2] S. Izumi, T. Yokoyama, A. Iwasaki, S. Sakai, "Three-dimensional Finite Element Analysis on Tightening and Loosening Mechanism of Threaded Fastener", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No. 4, pp. 604-615, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.09.009>
- [3] M. Zhang, Y. Jiang, C. H. Lee, "Finite Element Modeling of Self-loosening of Bolted Joints," *Transactions of the ASME*, Vol. 129, No. 2, pp. 218-226, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2406092>
- [4] H. Song, W. Chung, D. Jung, Y. Seo, "Optimum Shape Design of the Spring to Improve the Loose-proof Performance of the Lock Nut", *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 2, pp. 91-96, 2010.
- [5] G. E. P. Box, K. B. Wilson, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- [6] J. W. Bandler, Q. S. Chen, S. A. Dakrouy, A. S. Mohamed, M. H. Bakr, K. Madsen, J. Sondergaard, "Space Mapping: The State of the Art", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, No. 1, pp. 337-361, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2003.820904>
- [7] P. W. Hemker, D. Echeverria, "A Trust-Region Strategy for Manifold-Mapping Optimization", *Journal of Computational Physics*, Vol. 224, pp. 464-475, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2007.04.003>
- [8] N. Alexandrov, J. E. Dennis, R. M. Lewis, V. Torczon, "A Trust Region Framework for Managing the Use of

Approximation Models in Optimization”, *Structural Optimization*, Vol. 15, pp. 16 - 23. 1998.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01197433>

- [9] Y. K. Son, J. H. Ryu, "Sensitivity analysis of reliability estimation methods for attribute data to sample size and sampling points of time", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 581-587, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.2.581>

- [10] S. Park, "Preform Design of a Forged Punch by Approximate Optimization", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 7, pp. 4057-4064, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.7.4057>

박 상 근(Sangkun Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1999년 4월 : 삼성 SDS 책임연구원
- 2000년 4월 ~ 2001년 2월 : 서울대 BK21 기계분야 계약교수
- 2003년 8월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

CAD/CAM/CAE, 설계최적화, 전산기하학