

실험 계획법을 이용한 볼나사 튜브의 최적 설계 Optimal Desing of Ball screw Tube Using Design of Experiments

*김재민¹, #정원지¹, 임정희²

*J. M. Kim¹, #W.J. Chung. (wjchung@changwon.ac.kr)¹, J. H. Lim²

¹ 창원대학교 기계설계공학과, ² 일진글로벌 선형연구소

Key words : Ball screw, DOE(Design of experiments), ANSYSWorkbench®, Optimization design

1. 서론

볼나사는 회전운동을 직선운동으로, 직선운동을 회전운동으로 바꾸는 기계요소로서 사각 나사의 단점인 백래쉬를 제거할 수 있다. 또한 정밀한 이송이 가능하고, 효율이 높다는 장점이 있다. 그래서 대부분의 NC와 CNC 공작기계, 정밀측정기기, 자동화 기기, 로봇 그리고 자동차 등에 볼나사가 널리 사용되고 있다. 볼나사의 장점 중 하나는 높은 효율이다. 볼나사 효율은 볼나사 형상에 의한 운동 메카니즘과 마찰 특성에 의해 결정되므로 볼나사 형상설계 변수를 결정할 때와 볼나사 구동 성능을 평가할 때 중요한 척도가 된다. 볼나사에는 디플렉터타입, 튜브타입, 엔드캡 타입이 있다. 이 중에서 튜브형 볼나사에 적용되고 있는 튜브의 형상은 볼스크류의 Helix 곡선에서 발생하는 힘의 방향을 무시한 직선형 튜브를 사용하고 있다. 볼이 튜브를 통과하면서 튜브의 곡관에 반복적으로 부하를 가하므로, 피로파괴될 가능성이 있다. 이에 본 논문에서는 튜브타입 볼 나사의 튜브형상에 대해 실험계획법을 적용하고, ANSYSWorkbench®에서 정적 해석을 수행하여 응력을 관찰하고, 도출된 최적 설계값을 기존의 직선형 튜브형상과 비교 분석 하였다. 본 논문의 결과로 현재 사용되고 있는 직선형 튜브형상보다 성능이 향상될 것으로 예상되는 비틀림형 튜브형상에 대한 방향을 제시한다.



Fig. 1 Ball nuts into the tube.

2.1 모델 선정 및 모델링

튜브는 볼너트에 결속되어 볼을 이동시키는 역할을 한다. 튜브의 형상은 U 형태의 곡관에 끝단부가 볼이 구르는 그루브형상과 Helix 곡선에 의해 깎여져 있지만, 그 형상은 본 논문의 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 Fig. 2와 같이 간략화 하였다.

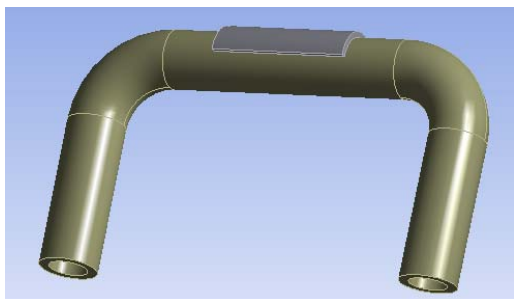


Fig. 2 The tube shape modeling.

2.2 실험계획법

실험계획법^{(1),(2)}은 통계적 분석 기법으로 식스 시그마의 개선 단계에 유용하게 쓰이고 있는 방법이다. 실험계획법은 CAE(Computer Aided Engineering)과 결합하여 사용할 때 매우 유용하게 쓰인다. 즉, 시간이 많이 소요되는 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 몇 번의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주 인자가 무엇인지 파악할 수 있다. 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적 조건을 찾아내는 것이다. 본 논문에서는 튜브 설계시 조정이 쉬운 튜브의 곡관의 반지름(Radial)과 곡관의 비틀림각(Angle), 그리고 튜브의 두께(Thickness)를 인자로 선정하였다. 각 인자의 Level은 5로 지정하고 다음 표와 같이 5-수준 설계를 수행 하였다. 실제로 3개의 인자에 5-수준의 실험일 경우 5의 3승으로 125번의 실험을 하여야 하지만, 실험계획법을 통해 25번의 실험으로 125번의 실험을 대표하여 최적에 설계 인자를 얻을 수 있다. Table 1은 각 인자별 Level을 표기한 것이다.

Table 1. Number Design of level

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Radial	6	7	8	9	10
Angle	88	88.5	89	89.5	90
Thickness	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85

2.3 실험

Table 1의 인자와 수준수에 대한 실험 계획을 미니탐®을 이용하여 Table 2와 같이 25번의 실험을 계획하였다. 실험에서 튜브에 가해지는 힘은 Helix 곡선과 튜브의 입수부가 만나는 지점을 기준으로 Helix 곡선에 법선방향으로 하여 모든 실험에 동일한 크기를 부여하였고, 튜브에 가해지는 부하가 튜브출구보다 입수부가 더 클 것으로 예상되기에 입수부에만 부하를 가하였다. 본 논문에서 고려되어지는 실험 결과값으로는 ANSYS Workbench®를 이용하여 튜브 형상에 대한 정적해석을 시뮬레이션하여 얻어진 응력값으로 두었고, 목적함수의 계량치 망목특성은 튜브에 발생하는 응력값이 작을수록 좋기 때문에 망소특성으로 고려하였다. Fig.3 ANSYSWorkbench®를 통해 정적인 상태에서 튜브에 힘을 가해 시뮬레이션한 결과이다. 실험 26,27은 각각 기존의 튜브형상 및 최적설계 형상에 대한 값이다.

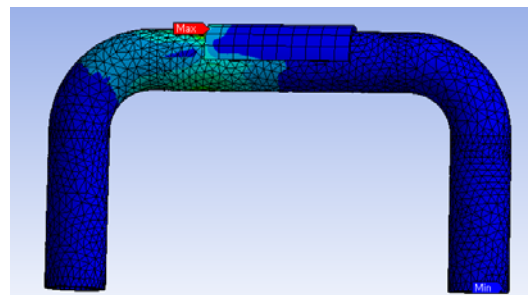


Fig. 3 Tubes of static analysis results.

Table 2. Plans for the shape of the tube experiments and results.

	Radial	angle	Thickness	Stress
1	6	88	0.65	1630.1
2	6	88.5	0.7	1540.1
3	6	89	0.75	1630.9
4	6	89.5	0.8	1565.2
5	6	90	0.85	1360.9
6	7	88	0.7	1565.2
7	7	88.5	0.75	1737.9
8	7	89	0.8	1565.2
9	7	89.5	0.85	1565.2
10	7	90	0.65	1555.8
11	8	88	0.75	1662.5
12	8	88.5	0.8	1454.1
13	8	89	0.85	1440.5
14	8	89.5	0.65	1779
15	8	90	0.7	1769.7
16	9	88	0.8	1537.9
17	9	88.5	0.85	1456.6
18	9	89	0.65	1641.7
19	9	89.5	0.7	1543.4
20	9	90	0.75	1483.8
21	10	88	0.85	1618.4
22	10	88.5	0.65	1563.8
23	10	89	0.7	1591.7
24	10	89.5	0.75	1501
25	10	90	0.8	1421.7
26	8	90	0.75	1706.2
27	8	88	0.85	1421

3. 분석

총 25번의 시뮬레이션을 수행한 결과를 바탕으로 망소특성 S-N선도를 그려본 결과 그림과 같이 튜브의 곡관의 반지름 (Radial) 8mm, 곡관의 비틀림각(Angle) 88°, 그리고 튜브의 두께(Thickness) 0.85 가장 낮은 응력값을 가진다고 나타났다. Fig. 4는 주효과 선도로써 인자 중에 Tube thickness가 결과 값에 가장 많은 영향을 주는지를 나타내고 있다. Fig. 5는 S-N선도를 나타낸 것이다. 이를 통해 나타난 최적의 설계변수를 바탕으로 튜브를 설계하여 피로해석⁽³⁾을 시뮬레이션한 것이다. 피로해석 조건으로는 10e+9번 반복하고, 부하는 하중을 적용, 제거를 반복하는 Zero-Based기법, 피로응력이론은 Ultimate Stress를 기준으로 하는 Goodman로 설정하였다.

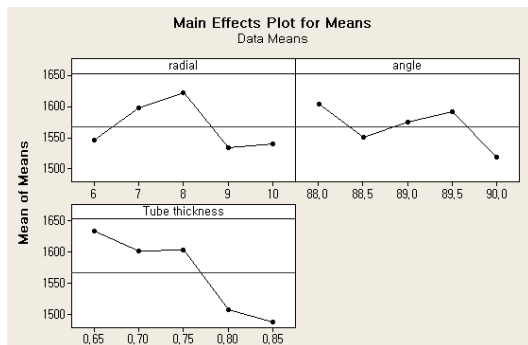


Fig. 4 Main Effects plot for Means

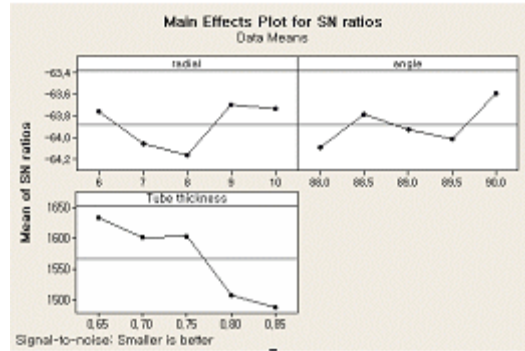


Fig. 5 Main Effects plot S-N ratios

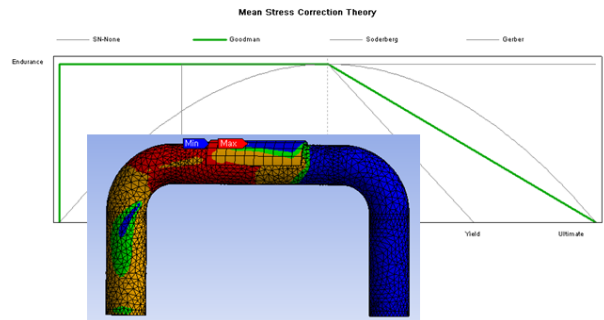


Fig. 6 Goodman theory and safety factor.

4. 결론

본 논문에서는 회전운동을 직선운동으로, 직선운동을 회전운동으로 변환시켜주는 볼스크류 중 한가지 타입인 튜브타입 볼스크류의 튜브형상에 대한 최적화를 수행하였다. 실험계획법을 통해 인자의 최적 설계값을 알아내었고, 그 최적의 설계 변수를 적용하여 정해석 및 피로해석을 시행하여 기존의 튜브형상과 비교 분석하였다. 그 결과, 기존의 직선형 튜브형상보다 실험결과 값으로 최적 설계된 비틀림 형상을 가진 튜브가 더 낫다는 결론을 얻을 수 있었다. 이번 실험에서는 단순한 정적해석결과만을 바탕으로 하고, 설계 인자 또한, 다루기 쉬운 것만 취하였기 때문에 정확한 결과 및 검증은 나타낼 수 없었다. 하지만, 앞으로 이러한 관련 연구가 계속 진행되어질 경우, 볼나사의 성능 향상에 많은 기여를 할 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Won Jee Chung, Dong Won Jung, "Six Sigma Robust Design of Fork Part for LCD Transfer System" WMSCI, 347~352, 2006.
2. 박상규, 이영광, MINITAB을 활용한 현장 실무 중심의 실험계획법, 424~442, 2003
3. ㈜태성에스엔이 FEA사업부여음, ANSYS Workbench® 왕초보 탈출하기, 시그마프레스