

유연 힌지를 이용한 변위 증폭 컴플라이언트 메커니즘 Compliant Mechanism for Amplification of Displacement using Flexure Hinge

*최윤성¹, #한창수¹, 신동익¹

*Y. S. Choi¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)¹, D. I. Shin¹

¹ 한양대학교 기계공학과

Key words : Flexure Hinge, Compliant Mechanism, Displacement Amplification, Shape Optimization, Finite element Analysis

1. 서론

나노 과학기술이 발달함에 따라 연구용 측정 장비나 반도체 소자 생산 장비에서 초정밀, 고 분해능의 액추에이터가 요구되고 있다. 이러한 초정밀, 고 분해능을 구현하는 액추에이터로는 압전 소자가 개발되어 사용되고 있다. 그러나 압전 소자의 특성상 높은 분해능을 구현하는 것은 용이하나 최대 변위가 압전 소자 길이의 약 0.1%에 그친다는 단점이 있다. 그래서 이를 보완하기 위해 유연 힌지의 원리를 응용한 변위 증폭 컴플라이언트 메커니즘을 개발하고자 한다.⁽²⁾

유연 힌지는 마찰과 백래시가 없고, 히스테리시스 오차가 작으며, 윤활이 필요 없다는 장점 때문에 마이크로 스케일의 정밀구조에 적합하여 반도체 제조장비, 초정밀 마이크로 스테이지, 광학 장비 등에 널리 사용되고 있다.

일반적으로 유연 힌지는 기구 요소 중 관절(Joint)에서 발생하는 기구적 오차를 최소화 하기 위해 사용된다. 그 특징으로는 국부적인 보(Beam)의 처짐을 탄성 한도 내에서 이용하며 변위확대나 축소기구에 주로 사용되어 왔다. 그리고 링크와 관절의 통합구조(Monolithic)로 설계와 제작이 가능하며 최근에는 방전가공으로 생산성 및 품질이 향상되었다.

본 논문은 유연 힌지를 이용한 변위 증폭 컴플라이언트 메커니즘에 대한 연구이다. 메커니즘 설계에는 근사모형을 이용한 형상 최적화를 수행하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램(ANSYS)을 이용하여 증폭비, 회전각 및 응력에 대한 구조해석 시뮬레이션을 하고 이에 대해 평가를 하였다.

2. 근사모형을 이용한 형상 최적 설계^(4,7)

최근 최적설계 분야에서는 근사모형을 이용하여 최적화를 수행하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이는 컴퓨터 하드웨어의 성능이 발전하였지만, 설계하고자 하는 시스템의 비선형성과 복잡성에 따라 해석에 드는 비용이 증가하기 때문에 최적설계를 수행하기 위해 근사함수로 대체하여 최적화를 수행한다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 근사모형을 이용한 형상 최적화를 위해서 문제 정식화, 변수 스크리닝, 데이터 샘플링, 크리깅 메타모델 구성, 진화 알고리즘을 이용한 예측의 5 가지 절차로 구성하여 근사 최적해를 구하였다.

먼저 최적 설계 과정을 위해 문제를 정식화하였다. 설계 변수로는 시스템에 영향을 미치는 지레비(L), 힌지부의 곡률 반경(R), 힌지부의 두께(d)로 하였고, 각 변수 값들의 범위와 최대 응력이 항복 강도 보다 작아야 한다는 구속조건을 정하였다. 그리고 목적함수는 변위 증폭의 최대화로 하였다.

Find $L_1, L_2, R_1, R_2, R_3, d_1, d_2, d_3$
to maximize Displacement Amplification
subject to $\sigma_{max} < \sigma_Y$
 $L_i^L < L_i < L_i^U, i = 1, 2$
 $R_j^L < R_j < R_j^U, j = 1, 2, 3$
 $d_k^L < d_k < d_k^U, k = 1, 2, 3$

두 번째로 설계 변수에 대해 스크리닝을 하였다. 스크리닝을 함으로써 시스템의 응답에 영향을 많이 끼치는 변수를 찾아내고, 그렇지 않은 변수를 설계변수에서 제외시킴으로써 최적설계의 효율을 높일 수 있었다. 그리하여 최종적인 설계변수는 5 가지가 선정되었다.

세 번째로 크리깅 모델을 사용하기 위한 데이터 샘플링 기법으로는 OLHD(Optimal Latin Hypercube Design)기법을 적용하였다. 여기서 LHD(Latin Hypercube Design)는 설계변수 각각의 단일 차원 내에서 실험점의 분포가 균등해지도록 배치시키는 방법으로 McKay 등에 의해 개발되었다. 그리고 임의적으로 생성된 LHD 가 추출된 실험점들 간에 공간적으로 상관관계가 생기는 단점을 보완하기 위해 최적계획법과 LHD 을 결합한 방법이 OLHD 이다. 이를 이용하여 50 세트의 변수 값들을 샘플링 하였고, 각각의 세트에 대해 시뮬레이션을 이용하여 구조해석 결과를 구하였다.⁽⁵⁾

네 번째로 시뮬레이션에서 얻어진 정보를 바탕으로 크리깅 메타모델을 구성하였다. 이는 일정한 횟수의 구조해석 결과를 구한 다음 통계적으로 처리하여 근사적 수학적 모델인 메타모델을 구하는 방법이다.⁽⁵⁾

마지막으로 구성된 크리깅 메타모델을 이용하여 진화 알고리즘을 통한 최적화를 수행하였다. 진화 알고리즘은 자연 세계의 진화 과정에 기초한 계산 모델로서, 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체로 표현한 후, 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 생성해 가는 원리로 동작된다. 최근 복잡하고 비선형적인 최적화 문제를 해결하는데 성공적으로 응용되고 있다.⁽³⁾

이러한 설계 방법론을 수행하는 데는 상용 PIDO 툴인 PIAAnO 가 사용되었다.

3. 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션

유한요소법은 어떤 물체를 유한 개의 요소로 분할하여 각각의 영역에 관하여 계산을 해나가는 수학적인 기법이다. 과거에는 단순 분석을 위한 하나의 도구로 사용되어 왔으나, 사용상의 급격한 발전에 의해 설계 과정에서 중요한 위치를 차지하게 되었다. 또한 컴퓨터 성능의 빠른 성장에 힘입어 실제 사용 환경을 시뮬레이션 하는데 이용이 가능해졌다.

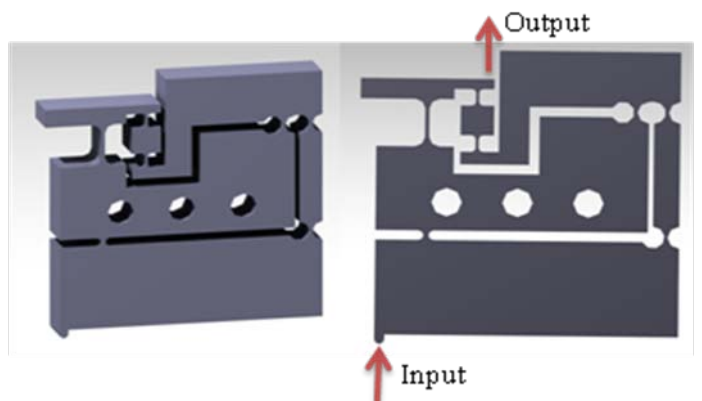


Fig. 1 Design of flexure hinge

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램(ANSYS)을 사용하여 응력과 변형에 대한 해석을 시뮬레이션 하였다. 제한조건으로는 메커니즘 구조의 고정 지점인 가운데 3 개의 구멍이 어느 방향으로든 움직이거나 회전하지 않도록 하였다. 그리고 시뮬레이션을 위한 물성치 값으로는 가격이 저렴하고, 가공이 용이한 Aluminum(2014-T6), Aluminum(6061-T6), Stainless Steel 을 대상으로 하였다. 각 재료에 대한 물성치 값은 Table 1 에 제시하였다.

Table 1 Mechanical properties of engineering materials⁽¹⁾

Materials	Modulus of Elasticity	Poisson's Ratio	Yield Strength	Density
Aluminum (2014-T6)	73 GPa	0.33	410 MPa	2800 kg/m ³
Aluminum (6061-T6)	70 GPa	0.33	275 MPa	2700 kg/m ³
Stainless Steel	195 GPa	0.30	520 MPa	7850 kg/m ³

각 재료에 대한 시뮬레이션은 모두 동일한 조건에서 입력 변위의 값만 변경하면서 진행하였다.

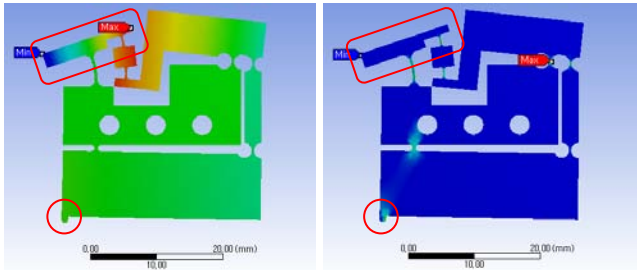


Fig. 2 Simulation of displacement(left) and stress(right)

Fig.2 는 Aluminum(2014-T6)에 대해 입력이 가해졌을 때의 변형과 응력 분포를 보여주는 그림이며, 이를 단순히 2 차원으로 봤을 때 좌측 상단의 회전 부위에서 왼쪽 꼭지점의 y 축 변위가 최소값을 가지고 오른쪽 꼭지점의 y 축 변위가 최대값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 그리고 재료에 따른 최대 응력 지점의 위치와 y 축으로 최소, 최대의 변위 값을 가지는 지점의 위치는 차이가 없었다

Table 2-1 Result of Simulation [Aluminum (2014-T6)]

Iter.	Input Disp. (mm)	Output Disp. (mm)	Angle (°)	Stress (MPa)
1	0.005	0.077	0.665	72.377
2	0.010	0.153	1.329	144.75
3	0.015	0.230	1.994	217.13
4	0.020	0.306	2.659	289.51
5	0.025	0.383	3.325	361.88
6	0.030	0.459	3.991	434.26

Table 2-2 Result of Simulation [Aluminum (6061-T6)]

Iter.	Input Disp. (mm)	Output Disp. (mm)	Angle (°)	Stress (MPa)
1	0.005	0.077	0.665	69.402
2	0.010	0.153	1.329	138.8
3	0.015	0.230	1.994	208.21
4	0.020	0.306	2.659	277.61
5	0.025	0.383	3.325	347.01
6	0.030	0.459	3.991	416.41

Table 2-3 Result of Simulation [Steel Stainless]

Iter.	Input Disp. (mm)	Output Disp. (mm)	Angle (°)	Stress (MPa)
1	0.005	0.077	0.670	193.46
2	0.010	0.154	1.340	386.93
3	0.015	0.231	2.010	580.39
4	0.020	0.309	2.681	773.86
5	0.025	0.386	3.352	967.32
6	0.030	0.463	4.023	1160.8

시뮬레이션 결과는 Table 2 에 제시한 바와 같이 재료별 변위 증폭비에는 약간의 차이가 있었으며 이는 각 재료의 Poisson's Ratio 가 유사하기 때문이라 판단된다. 반면 응력 값에서는 큰 차이를 띄고 있었으며 이러한 차이는 탄성계수의 영향이라 판단 된다.

Table 3 Evaluation

Materials	Amplification	Stress @ 3°	Angle/Stress
Aluminum (2014-T6)	15.308	326.5083 MPa	0.0092 MPa/°
Aluminum (6061-T6)	15.308	313.0118 MPa	0.0096 MPa/°
Stainless Steel	15.429	865.6227 MPa	0.0035 MPa/°

이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 증폭 메커니즘의 성능은 응력에 대한 회전각의 비율, 3 도에서의 최대 응력과 항복강도를 비교함으로써 평가를 하였다. Stainless Steel 은 다른 재료에 비해 응력값이 너무 크고, Aluminum (2014-T6) 은 3 도에서 항복강도의 79.6% 수준으로 상대적으로 가장 좋다고 볼 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 유연 힌지를 이용한 변위 증폭 컴플라이언트 메커니즘에 대한 연구이다. 이 변위 증폭 메커니즘은 링크와 관절의 통합구조로 되어 있으며, 근사모델을 이용한 형상 최적화 및 유한요소해석을 이용한 구조해석 시뮬레이션에 의해서 설계가 이루어졌다. 성능은 0.03mm 이내의 입력 변위로 허용 응력 범위 내에서 3 도 이상의 회전이 가능하며 증폭비는 약 15.3 배 이다. 차후에는 이 증폭 메커니즘을 시스템에 적용하기 위해 선형성, 히스테리시스, 수명 등에 대한 연구를 진행할 계획이다.

후기

본 연구는 한국전기연구원의 차세대소재성형기술개발사업 중 유연 힌지를 이용한 초정밀 구동 메커니즘 개발에 의해 수행 되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Roy R. Craig, Jr., "Mechanics of Materials," Wiley, Appendix F, 2000.
- Fredric E. Scire and E. Clayton Teague, "Piezodriven 50-μm Range Stage with Subnanometer Resolution," Rev. Sci. Instrum., **49**(12), 1735-1740, 1978.
- D. E. Goldberg, "Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age," Communications of the ACM, **39**(3), 113-119, 1994.
- Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J., Wynn, H.P., "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science **4**(4), 409-435, 1989.
- 신용식 외 3 인, "크리깅 모델을 이용한 순차적 근사최적화," 대한기계학회논문집, A, **29**(9), 1199-1208, 2005.
- 박재용 외 5 인, "실험계획법을 이용한 능동형 미소혼합기의 근사최적화," 한국공작기계학회, 274-279, 2008.
- 박경진, 강병수, "해석적 설계방법론," 2007