

실험계획법을 이용한 마이크로 스테이지 설계에 관한 연구

예상돈*(동의대 대학원 기계공학과), 정재훈(동의대 대학원 기계공학과), 이재광(동의대 대학원 기계공학과), 민병현(동의대 기계공학과)

A Study on Design of Micro Stage using Design of Experiment

S. D. Ye(Mech. Eng. Dept., DEU), J. H. Jeong(Mech. Eng. Dept., DEU), J. K. Lee(Mech. Eng. Dept., DEU),
B. H. Min(Mech. Eng., DEU)

ABSTRACT

The object of this study was to design of micro stage, which is one of the equipments embodied in ultra precision positioning mechanism. Design factors for micro stage were decided a roundness of hinge, a thickness of hinge, a thickness of stage, a length of arms and a clearance of division. To obtain the 1st natural frequency and equivalent stresses, FEM simulation was performed using the table of orthogonal arrays and Taguchi method was used to determine the optimal design parameters. As results of this study, the size of 1st natural frequency and equivalent stresses on micro stage was influenced significantly by a thickness of hinge and a length of arm.

Key Words : FEM(유한요소법), Taguchi method(다구찌 방법), Design of Experiment(실험계획법), Micro stage(마이크로 스테이지), Ultra precision positioning mechanism(초정밀위치결정기구)

1. 서론

최근 위치결정기술은 현재 산업 속에서 아주 광범위하게 활용되고 있고 이러한 기술의 발달로 대형에서 아주 작은 소형 부품에 이르기까지 아주 많은 분야에서 사용되고 있다. 또한 산업의 고정도화, 고정밀화가 요구되어짐에 따라 위치결정기술은 마이크로미터나 나노미터 수준의 초정밀위치결정기술을 요구하고 있다. PZT 액추에이터를 이용한 마이크로 스테이지는 초정밀위치결정을 구현하는 하나의 구동장치이며, 원자현미경, 나노 가공기술 등의 초정밀분야의 이송 시스템으로 활용되고 있다.

본 연구는 이러한 PZT 액추에이터를 이용한 마이크로 스테이지의 설계에 관한 것으로 초정밀 분야에 많이 사용되고 있는 플렉슈어 힌지 메카니즘을 갖는 마이크로 스테이지를 설계하기 위한 것이다. 먼저 설계하고자 하는 마이크로 스테이지와 이송 플레이트의 크기를 200 mm ? 50 mm와 50 mm ? 5 mm로 제한하고 최대 변위 20 μ m, 고유주파수 250 Hz 이상을 만족하는 마이크로 스테이지를 설계하는 것이 목적이다.

플렉슈어 힌지를 갖는 마이크로 스테이지의 최적 설계를 위해서 적당한 설계인자들을 선정하고 스테이지에 발생하는 최대유효응력과 1차 고유주파수를 반응 값으로 사용하며 선정된 인자들을 요인 배치법에 의해 설계인자들의 반응 값에 미치는 영향을 분석하고, 다구찌 기법을 사용하여 각 인자들의 최적 수준을 결정하고자 하며 이러한 실험을 수행하고 결과의 비교를 위해 상용유한요소해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하고, 이론적 해석을 수행하고자 한다.

2. 유한요소모델링

2.1 설계인자

본 연구에서 설계하고자 하는 초정밀 마이크로 스테이지의 크기는 200 mm ? 50 mm이내 그리고 이송 플레이트는 50 mm ? 5 mm로 제한하고, 최대 변위가 20 μ m 이상이고 작동 주파수가 250 Hz까지 유효한 설계를 하는 것이 목적이다.

초정밀 시스템을 설계에서는 연결부위의 상대적

움직임이 없는 탄성요소를 많이 사용하고 변위의 오차를 감소시키기 위하여 대칭 구조를 많이 선택하고 있다. 본 연구에서는 이러한 요구를 만족하고 인장력에 약한 PZT에 예압을 걸어주기 위해 대칭구조를 갖는 플렉슈어 힌지 메카니즘을 사용했으며 구조는 Fig. 1(a)과 같이 x 방향의 변위를 생성하기 위해 12개의 링크로 구성되어 있고 이것을 플렉슈어 힌지 구조로 바꾼 것이 Fig. 1(b)이다.

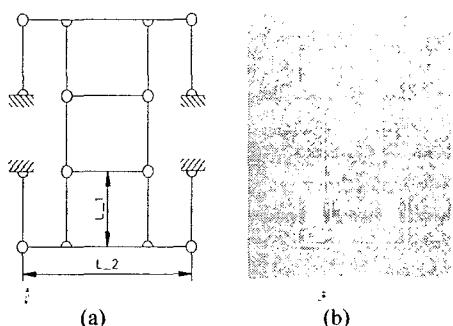


Fig. 1 Kinematic diagram and flexure mechanism

총 12개의 링크로 구성되어 있으며 평면 운동이라 가정하면 링크마다 3자유도를 가지므로 총 자유도는 1자유도를 가진다.

$$\text{Total DOF} = 12 \times 3 - 3 - 16 \times 2 = 1$$

플렉슈어 힌지 구조는 Fig. 2와 같으며 마모, 조립오차, 간섭이 없고 변위가 연속적이고 대칭구조에서는 온도변화에도 둔감하며 힌지 부분의 탄성 변형에 의해 높은 반복성과 정확성을 가지고 있다.

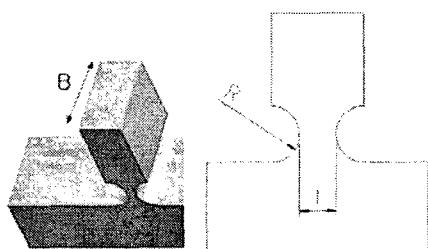


Fig. 2 Parameters on the dimension of flexure hinge

초정밀 마이크로 스테이지의 설계에서 중요한 특성은 최대 변위, 최대 사용 주파수 그리고 안정성이다. 따라서 1차 고유주파수와 일정 변위에서 발생하는 최대 유효응력을 초정밀 마이크로 스테이지를 설계하는 목적 함수로 선택하였다. 마이크로 스테이지 제작 시에 고려해야 할 설계인자들은 라운드의 곡률(R), 힌지부분의 두께(T), 스테이지 두께(B), Fig.

1(a)에서와 같이 암의 길이(L_1, L_2) 그리고 Fig. 1(b)에서와 같이 링크들 사이의 틈새(C)이다.

2.2 경계조건

목적함수가 1차 고유주파수와 일정변위에서 힌지 부위에 발생하는 최대 유효응력이므로 모드해석과 구조해석을 수행해야한다. 모드 해석을 위해 마이크로 스테이지가 조립될 모서리 부분에 있는 4개의 홀에 모든 자유도를 구속하고 모드해석을 수행하며 재료 물성치는 탄성계수와 밀도가 필요하다. 본 과제에서는 Table 1과 같이 알루미늄을 마이크로 스테이지의 재료로 사용하고 탄성계수는 68.9 GPa, 밀도는 2700 kg/m³을 적용하였다. 모드 추출 방법으로는 Block Lanczos 방법을 사용하였다.

모드해석을 수행한 후 1차 고유진동수를 찾고 다시 구조해석을 수행한다. 스테이지의 최대 변위를 20 μm로 제한하였으므로 구조해석의 경계조건으로 x축으로 20 μm의 변위를 인가하여 마이크로 스테이지에 발생하는 최대 유효응력을 목적 값으로 하였다.

Table 1 Material properties of aluminum

Aluminum6061 T651			
Modulus of Elasticity [MPa]	Poisson's Ratio	Yield Strength [MPa]	Density [kg m ⁻³]
68.9e3	0.33	276	2700

3. 실험계획법

3.1 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법은 종래에 제어 불가능한 환경 조건이나 제어하기 어려운 생산 조건 등의 원인들이 데이터에 주는 영향의 정도를 객관적이고 계량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시한 것으로, 결과 값 산포의 크기를 손실함수(S/N ratio)로 변환하여 산포를 작게 하는 인자들의 최적 조건을 찾아가는 강건 설계에 주로 사용된다. 또한 직교배열표를 사용하여 인자의 수가 많은 경우에도 크게 실험횟수를 증가시키지 않고 실험하는 일부 실사 법이 주로 사용된다.

본 과제에서 설계 인자로 선택되어진 6개의 변수들을 설계 제약조건 내에서 Table 2와 같이 각각 3수준으로 결정하였다. 힌지의 반경 R은 1 mm ~ 2 mm로 제한했고 수준은 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 힌지의 두께 T의 수준은 0.3 mm, 0.6 mm, 0.9 mm, 마이크로 스테이지의 두께 B는 10 mm, 20 mm, 30 mm, Fig. 1에서 암길이 L_1은 15 mm, 20 mm, 25 mm, 암길이 L_2는 50 mm, 60 mm, 70 mm, 와이어 커팅이 될 암사이의 틈새(C)는 0.25

mm, 0.5 mm, 0.75 mm로 각각 3수준으로 결정하였다.

6개의 인자와 3개의 수준으로 Table 3과 같이 총 27번의 시뮬레이션을 수행하는 직교배열표($L_{27}(3^6)$)를 작성하였다.

Table 2 Control factors and their levels

Control factors	Level [mm]		
	1	2	3
Radius of hinge(R)	1	1.5	2
Thickness of hinge(T)	0.3	0.6	0.9
Thickness of stage(B)	10	20	30
Arm 1(L_1)	15	20	25
Arm(L_2)	50	60	70
Clearance(C)	0.25	0.5	0.75

Table 3 Table of orthogonal arrays for simulation

Order	R	T	B	L_1	L_2	C
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	1	1	3	3
4	1	2	2	2	1	1
5	1	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3
7	1	3	3	3	1	1
8	1	3	3	3	2	2
9	1	3	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3
12	2	1	2	3	3	1
13	2	2	3	1	1	2
14	2	2	3	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1
16	2	3	1	2	1	2
17	2	3	1	2	2	3
18	2	3	1	2	3	1
19	3	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1
21	3	1	3	2	3	2
22	3	2	1	3	1	3
23	3	2	1	3	2	1
24	3	2	1	3	3	2
25	3	3	2	1	1	3
26	3	3	2	1	2	1
27	3	3	2	1	3	2

3.2 결과 및 분석

Table 3과 같이 시뮬레이션을 수행한 결과 Table 4와 같은 1차 고유진동수와 스테이지의 힌지에 발생하는 최대유효응력 값을 얻을 수 있었고 스테이지에 x 방향으로 20 μm 의 변위를 인가했을 때 PZT 액추에 이터와 접촉한 스테이지에 발생하는 반력 값을 얻을 수 있었다. 여기서 1차 고유주파수는 재작하고자 하는 마이크로 스테이지의 사용 주파수의 한계를 결정하므로 클수록 좋은 특성을 가진다. 그러나 주파수가 크다는 것은 반대로 강성이 크다는 의미이므로 강성이 커지면 변위가 작아진다. 따라서 목적함수로 일정 변위가 인가되었을 때 힌지 내에 굽힘에 의해 발생하는 최대유효응력을 1차 고유주파수와 함께 고려할 필요가 있다.

Table 4 Results of FEM simulation

Order	1st Frequency[Hz]	Stress[MPa]	Reaction force[N]
1	148.59	11.64	-1.11
2	148.52	11.46	-1.11
3	148.43	11.22	-1.11
4	226.91	10.34	-5.82
5	222.62	10.17	-5.64
6	219.14	9.70	-5.42
7	267.96	9.32	-13.43
8	262.80	9.27	-12.99
9	259.07	9.43	-12.45
10	78.06	5.60	-0.74
11	78.04	5.52	-0.74
12	75.37	5.70	-0.73
13	306.63	12.40	-14.41
14	306.73	11.97	-14.29
15	297.46	11.77	-14.45
16	335.81	10.06	-6.42
17	331.78	10.20	-6.23
18	325.10	10.05	-6.40
19	102.66	5.81	-1.74
20	94.75	5.75	-1.58
21	93.47	5.93	-1.53
22	162.40	6.64	-1.59
23	158.18	7.00	-1.60
24	162.33	6.97	-1.70
25	461.32	11.83	-21.52
26	449.67	12.04	-21.86
27	448.67	11.76	-22.01

다구찌 분석법에는 목적함수가 클수록 좋은 경우에는 망대특성, 작을수록 좋은 경우는 망소 특성, 특정한 값을 기대할 때는 망목특성으로 영향력을 분석한다. 1차 고유주파수만을 목적함수로 선택하고 망대 특성을 적용하여 분석한 결과 (R_1, T_3, B_3, L_1 ,

L_2, C_3) 헌지의 반경은 1수준인 1 mm, 헌지의 두께는 3수준인 0.9 mm, 암 길이 L_1 은 1수준인 15 mm 일 때 1차 고유주파수 값이 크게 나타나며 스테이지의 두께와 암 길이 L_2 그리고 암사이의 틈새는 고유주파수에 영향력이 작다고 분석되었다. 최대유효응력만을 목적함수로 선택하고 망소특성으로 분석한 결과 ($R_3, T_1, B_2, L_1, L_2, C_3$) 헌지의 반경은 3수준인 2 mm, 헌지의 두께는 1수준인 0.3 mm, 암 길이 L_1 은 3 수준인 25 mm일 때 최대유효응력 값이 작게 나타나며 스테이지의 두께와 암 길이 L_2 그리고 틈새는 유효응력에 영향력이 작다고 분석되었다. 고유주파수는 헌지의 두께에 가장 많은 영향력을 받고 유효응력은 암 길이 L_1 에 영향력을 가장 많이 받는다고 분석되었다.

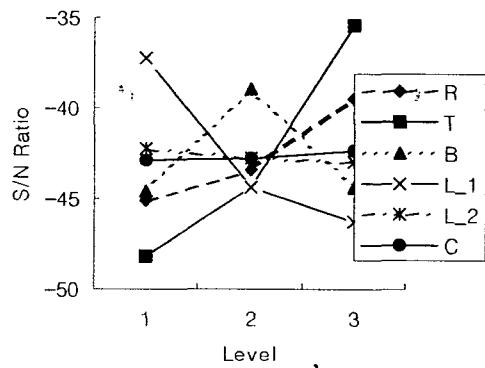


Fig. 3 Main effect from plots of S/N ratios

고유주파수와 유효응력을 모두 고려하기 위해서 결과로 얻어진 1차 고유주파수의 값을 500 Hz 와의 차이 값으로 환산함으로써 망소특성으로 유효응력과 함께 고려하였다. 다구찌 분석법은 결과 값들의 분산 값을 이용함으로 500 Hz와의 차이 값을 사용해도 결과에는 변화를 주지 않는다. 1차 고유주파수와 유효응력을 함께 목적함수로 사용하여 망소특성으로 분석한 결과 S/N 비는 Fig. 3과 같고 헌지의 반경은 3수준인 2 mm, 두께는 3수준인 0.9 mm, 스테이지의 두께는 2수준인 20 mm, 암 길이 L_1 은 1수준인 15 mm, 암 길이 L_2 는 1수준인 50 mm, 암의 틈새는 3수준 0.75 mm로 나타났으며 직교배열표의 25번과 같은 설계인자의 수준을 나타내고 있다 ($R_3, T_3, B_2, L_1, L_2, C_3$). 1차 고유주파수와 최대유효응력을 함께 고려했을 때 T-L_1-R-B의 순서로 영향력이 평가되었고 암 길이 L_2 와 틈새는 상대적으로 목적함수에 영향력이 적은 것으로 나타났다. 다구찌 분석에서 최적일 때 1차 고유주파수는 461.32 Hz이고 최대유효응력은 11.83 MPa로 나타났다. 본 과제에서 제작하고자 하는 마이크로 스테이지의 특성은 주파수가 250 Hz 이상을 요하며 재료의 항복강도는 276 MPa 이므로 안

전율이 10 이상으로 적용된 상태이다. 따라서 구조적인 문제 역시 안전영역에 들어가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

초정밀 마이크로 스테이지를 설계하기 위한 6개의 설계인자를 헌지의 반경, 헌지의 두께, 스테이지 두께, 암 길이 L_1 , 암 길이 L_2 및 틈새를 선택하였다. 1차 고유 주파수와 헌지에 발생하는 최대 유효응력을 목적 값으로 하여 다구찌 실험계획법을 수행한 결과 두 목적함수에 대한 영향력은 헌지의 두께, 암 길이 L_1 , 헌지 반경, 스테이지 두께 순으로 나타났다. 특히 고유주파수에는 헌지의 두께가 가장 큰 영향력을 주었고, 최대 유효응력에는 암 길이 L_1 이 많은 영향력을 주고 있음을 알 수 있었다.

직교배열표에 따라 시뮬레이션을 수행 하여 다구찌법에 의한 분석을 행한 결과, 헌지반경 2 mm, 헌지 두께 0.9 mm, 스테이지 두께 20 mm, 암 길이 L_1 은 15 mm, 암 길이 L_2 는 50 mm 그리고 틈새는 0.75 mm로 되는 최적 조합 ($R_3, T_3, B_2, L_1, L_2, C_3$)을 얻을 수 있었다. 최적 조합 하에서 헌지에 발생하는 최대 유효응력은 11.83 MPa, 1차 고유주파수는 461.32 Hz로 나타났다.

참고문헌

- Lee, Chang Hong, "Ultra-precision Positioning Technology," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 9~15, 2000.
- Kim, Seung Woo, "Design and Control of Nano-Precision Machine Systems," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 13~17, 2002.
- Kim, J. Y., Kwac, L. K., Han, J. H., Kim, H. W. and Akira Shimokohbe, "A Study on the Optimal Structural Design using FEM for Micro Stage," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 60~65, 2002.
- Mark E. Vaughan, "The Design, Fabrication, and Modeling of a Piezoelectric Linear Motor," State University of Virginia, 2001.
- Ye, Sang Don, Jeong, Jae Hoon, Min, Byoung Hyeon, "A Study on Design and Manufacture of an Inchworm Linear Motor System," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 174~181, 2004.