

반응표면분석법을 이용한 초정밀 마이크로스테이지의 설계

예상돈*, 민병현#, 이재광*

Design of Ultra-precision Micro Stage using Response Surface Methodology

Sang-Don Ye*, Byeong-Hyeon Min[#], Jae-Kwang Lee*

ABSTRACT

Ultra precision positioning mechanism has been widely used on semiconductor manufacturing equipments, optical spectrum analyzers and cell manipulations. Ultra precision positioning mechanism consists of several actuators, sensors, guides and control systems. Its efficiency depends on each performance of components. The object of this study is to design and analyze the micro stage that is one of the equipments embodied in ultra precision positioning mechanism. The micro stage consists of PZT actuators and flexure hinges. The structural design of flexure hinge is optimized by using RSM and FEM. The control factors concerned with the design of flexure hinges of stage and arms are optimized by minimizing the equivalent stress on the hinge and maximizing 1st natural frequency based on RSM and FEM simulation under various kinds of design conditions.

Key Words : Micro Stage(마이크로 스테이지), PZT(압전소자), RSM(반응표면분석법), FEM(유한요소법), Flexure Hinge(유연힌지)

1. 서 론

한때 산업은 보다 더 큰 것을 지향하였지만 계속적인 산업의 발달로 인하여 큰 것으로부터 보다 더 작은 것들로 관심의 대상이 변하고 있고 최근에는 관심의 대상들이 나노미터 크기에 이르고 있다. 초정밀 위치결정 메커니즘은 반도체 생산 장비, 광학 장비 등 아주 폭 넓은 분야에서 사용되고 있다. 마이크로 스테이지는 이러한 초정밀 위치결정 기구 중의 하나

이며 몇 개의 액추에이터, 센서, 가이드와 제어시스템들로 구성되어 있다. 마이크로 스테이지의 성능은 각각의 요소들에 의해 결정된다^[1,2]. 마이크로 스테이지의 메커니즘으로 많은 연구자들이 유연힌지를 선택하고 있으며, 최근에는 다축의 자유도를 갖는 스테이지도 개발되고 있다. 그리고 이러한 스테이지의 측정 기법 향상을 위한 연구도 진행되고 있다^[3].

본 연구의 목적은 초정밀 위치결정 기구 중의 하나인 마이크로 스테이지를 해석하고 설계하고자 한다. 마이크로 스테이지는 압전 액추에이터들과 유연힌지로 이루어져 있다. 마이크로 스테이지용 유연힌지의 설계를 위해 힌지에 발생하는 최대 유효응력을 최소화하고 1차 고유진동수를 최대화하여 설계인자

* 동의대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 동의대학교 기계공학과

E-mail: bhmin@deu.ac.kr

들을 최적화 하였다. 최적화를 위하여 반응표면분석 법과 유한요소법을 사용하였으며 간단한 이론식을 구성하여 결과들을 비교하였다^[4-6].

2. 마이크로 스테이지

2.1 구조

본 과제에서 다루는 마이크로 스테이지는 16개의 힌지와 12개의 링크로 구성되어 1축 방향의 부드러운 움직임을 만들 수 있는 구조이다. 여기에 사용된 유연힌지는 제작을 위한 조립공정이 필요 없으며, 접촉이 되지 않아 마모가 없는 상태이다. 변위는 연속적이며 온도에 둔감하도록 대칭구조로 되어 있으며, 유연힌지의 탄성변형을 변위로 사용하기 때문에 높은 반복성과 정확성을 가지고 있다.

Fig. 1은 유연힌지를 갖는 마이크로 스테이지의 최적설계를 위한 일련의 과정을 나타내고 있다.

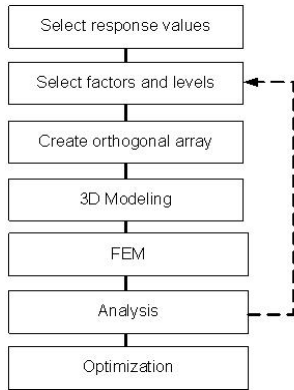


Fig. 1 Procedure of optimal design

마이크로 스테이지의 크기는 가로, 세로가 200mm× 150mm이고, 이송테이블은 50mm×25mm이다. 마이크로 스테이지의 변위는 20 μm이고, 증폭기의 최대 사용 범위를 고려하여 1차 고유진동수는 250Hz 이상이어야 한다. Fig. 2는 유연힌지를 갖는 마이크로 스테이지의 형상을 보여주며, 마이크로 스테이지의 재료는 알루미늄 합금으로 재료의 물성치는 Table 1과 같고, 스테이지의 자유도는 식 (1)과 같이 1이 된다^[7].

(1)

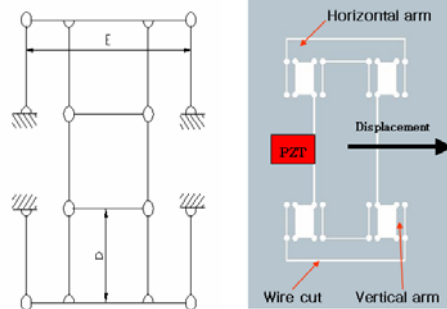


Fig. 2 (a) Kinematics diagram (b) Mechanism of micro stage

Table 1 Material properties of Aluminum 6061

Material	Modulus of elasticity [GPa]	Poisson's ratio	Yield strength [MPa]	Density [kg/m ³]
Aluminum (6061)	68.9	0.33	276	2700

2.2 유연힌지의 이론적 설계방법

유연힌지 구조를 갖는 마이크로 스테이지의 이론적 접근을 위해 수직 압, 수평 압 그리고 이송테이블은 강체라고 가정하였다. 미소 변위가 발생 했을 때 유연힌지 구조에 의해 변위와 응력이 힌지에 집중되기 때문에 수직 압과 수평 압을 수학적 간편함을 위해 강체라고 가정했다. 그리고 유연힌지는 탄성체라고 가정하였다. 식 (2)는 라그랑주 방정식을 이용하여 유도하였다^[7].

$$F = \left(M + \frac{1}{2}m + \frac{1}{2}m_l + 2\frac{J}{l^2} \right) \ddot{x} + \frac{4}{l^2} k_\theta x = 0 \quad (2)$$

여기서, M은 이송테이블의 질량이고, m은 수평압, m_l은 수직 압의 질량, 그리고 J는 질량관성 모멘트이다. 식 (2)에 의해 고유 진동수는 식 (3)과 같고 스테이지의 최대변위는 식 (4)와 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}}{M_{eff}}} \quad [Hz] \quad (3)$$

$$x_{max} = 2l\theta_{max} \quad (4)$$

여기서, k_{eff} 는 변위(x)의 항이고 M_{eff} 는 가속도 항이다.

3. 마이크로 스테이지의 설계

3.1 반응표면분석법

반응표면분석법은 독립변수와 종속변수간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수의 변화에 따른 반응량을 예측하는 것이고, 독립변수의 어떤 값에서 최적화가 될 것인가를 찾아내고 데이터 분석을 통하여 적합한 반응표면의 성질을 규명하는 것이다.

유연힌지는 스테이지의 구조설계에 있어 매우 중요한 부분이다. 마이크로 스테이지는 목적하는 변위 내에서 힌지에 발생하는 유효응력이 적을수록 좋으며, 1차 고유 진동수는 높을수록 좋은 성능을 가진다. 이와 같은 목적을 만족하기 위해 유한요소법과 반응표면분석법을 이용하였다. 식 (5)와 같은 이차 회귀방정식을 구하기 위하여 중심합성법을 사용하였다.^[8]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5)$$

여기서, 매개변수 β 는 회귀계수 이고, ϵ 은 오차값을 나타낸다. 반응값 y 는 제어인자 x_i 에 종속한다.

유연힌지는 마이크로 스테이지에 있는 압전 액추에이터에 예압을 걸어주고 액추에이터가 구동할 때에 변위를 전달하는 역할을 하고 있다. 유연힌지의 구조 때문에 힌지 부위에 발생하는 응력집중을 작게 하여야 마이크로 스테이지의 수명을 보다 더 연장할 수 있다. 스테이지의 고유진동수가 높다는 의미는 사용할 수 있는 주파수가 넓다는 것을 뜻한다. 따라서, 힌지에 발생하는 유효응력을 작게하고 고유 진동수를 크게 하도록 설계인자들을 최적화해야 한다.

본 연구에서 마이크로 스테이지를 주어진 조건 내에서 최적화하기 위해 힌지 부위에 발생하는 최대 유효응력과 스테이지가 가지는 1차 고유진동수를 반응값으로 선택하였다.

Table 2 Control factors and their levels concerned with the design of micro stage

Control factors	Coded level				
	- α	-1	0	1	α
Roundness of hinge (A)	0.9054	1.25	1.5	1.75	2.0946
Thickness of hinge (B)	0.362159	0.5	0.6	0.7	0.83784
Thickness of stage (C)	8.1079	15	20	25	31.8921
Length of vertical arm(D)	15.2432	18	20	22	24.7568
Length of horizontal arm (E)	45.1079	52	57	62	68.8921
Thickness of wire-cut (F)	0.362159	0.5	0.6	0.7	0.83784

인자들이 너무 많으면 실험의 정밀도가 낮아지므로 제안된 영역 안에서 최적의 인자를 선택해야 한다. 설계인자들의 수준수도 최적의 수로 결정해야 한다. 마이크로 스테이지의 설계를 위해 힌지의 반경(A), 힌지의 두께(B), 스테이지의 두께(C), 수직 암의 길이(D), 수평 암의 길이 (E) 그리고 와이어 컷의 두께(F)를 설계인자로 선택하였다. 여섯 개의 인자 모두 5수준으로 나누었고 반응표면분석법을 수행하기 위해 결정된 인자들과 수준들은 Table 2 와 같다. 여기서 α 는 2.378로 선택했고, 블록의 수는 시뮬레이션이기 때문에 없는 것으로 가정했다.

반응표면분석법 중에 중심합성계획법을 사용하기 위해 직교배열표를 작성하였고, 이러한 직교배열표는 선택된 인자들의 수준을 조합하고 실험 순서 및 실험 횟수를 결정하기 위한 것이다. Table 3은 인자 6개에 각 5 수준을 갖는 직교배열표이다.

Table 3 Orthogonal array and results by FEM

Run	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Frequency [Hz]	Stress [Mpa]
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	204.72	10.19
2	1	-1	-1	-1	-1	1	203	8.98
3	-1	1	-1	-1	-1	1	295.42	10.96
4	1	1	-1	-1	-1	-1	287.62	10.07

5	-1	-1	1	-1	-1	1	206.71	10.22
6	1	-1	1	-1	-1	-1	198.85	9.07
7	-1	1	1	-1	-1	-1	296.98	10.91
8	1	1	1	-1	-1	1	284.72	10.1
9	-1	-1	-1	1	-1	1	161.62	8.06
10	1	-1	-1	1	-1	-1	155.39	7.54
11	-1	1	-1	1	-1	-1	233.36	8.85
12	1	1	-1	1	-1	1	224.61	8.33
13	-1	-1	1	1	-1	-1	161.41	8.22
14	1	-1	1	1	-1	1	160.23	7.4
15	-1	1	1	1	-1	1	232.36	8.88
16	1	1	1	1	-1	-1	227.03	7.73
17	-1	-1	-1	-1	1	1	203.48	10.33
18	1	-1	-1	-1	1	-1	195.67	9.19
19	-1	1	-1	-1	1	-1	292.89	10.89
20	1	1	-1	-1	1	1	282.81	10.09
21	-1	-1	1	-1	1	-1	203.74	10.29
22	1	-1	1	-1	1	1	199.83	8.97
23	-1	1	1	-1	1	1	292.2	10.92
24	1	1	1	-1	1	-1	284.36	10.1
25	-1	-1	-1	1	1	-1	160.68	8.26
26	1	-1	-1	1	1	1	156.71	7.39
27	-1	1	-1	1	1	1	229.55	8.96
28	1	1	-1	1	1	-1	222.34	7.62
29	-1	-1	1	1	1	1	160.63	8.12
30	1	-1	1	1	1	-1	155.03	7.63
31	-1	1	1	1	1	-1	230.8	9.19
32	1	1	1	1	1	1	224.4	8.27
33	- α	0	0	0	0	0	226.55	10.33
34	α	0	0	0	0	0	209.08	8.29
35	0	- α	0	0	0	0	130.49	7.69
36	0	α	0	0	0	0	309.64	9.63
37	0	0	- α	0	0	0	212.2	8.88
38	0	0	α	0	0	0	214.51	8.95
39	0	0	0	- α	0	0	294.4	11.86

40	0	0	0	α	0	0	165.17	7.37
41	0	0	0	0	- α	0	217.82	9.2
42	0	0	0	0	α	0	212.28	9.02
43	0	0	0	0	0	- α	216.97	9.07
44	0	0	0	0	0	α	215.98	8.96
45	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
46	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
47	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
48	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
49	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
50	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
51	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
52	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88
53	0	0	0	0	0	0	213.64	8.88

유한요소 해석을 직교 배열표에 따라 53번 모의실험을 수행하였다. 힌지에 발생하는 최대 유효응력과 스테이지가 가지는 1차 고유 주파수를 반응값으로 사용하였다. 해석순서는 1차 고유주파수를 분석하기 위하여 진동 해석을 먼저 수행한 다음 스테이지의 최대 변위를 구속조건으로 부여하여 힌지 부위에 발생하는 최대 유효응력값을 반응값으로 사용하였다. APDL (ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 실험의 반복과 각 결과값을 획득하여 분석에 이용하였다. Fig. 3은 마이크로 스테이지의 유한요소 모델링이다.

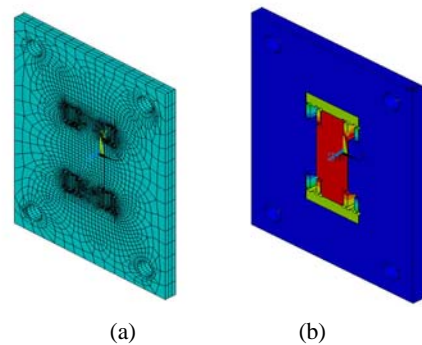


Fig. 3 (a) FEM modeling (b) Modal analysis

3.2 반응표면분석의 결과

유한요소법을 이용하여 스테이지의 1차 고유진동수와 스테이지에 변위가 인가되었을 때 유연힌지 내에 발생하는 최대 유효응력을 구할 수 있었다. 1차 고유진동수는 마이크로 스테이지의 실제 사용 주파수를 결정하고 최대 유효응력은 마이크로 스테이지의 수명시간과 변위를 결정하는 요인이 된다. 결국 좋은 스테이지는 주파수는 높고 유효응력은 낮게 설계되어야 한다.

Table 4는 모든 인자항을 고려했을 때와 유효인자들만을 고려했을 때의 이차항의 계수를 나타내었다. 반응표면분석법에 의해 식 (6), (7) 과 같은 2차 회귀방정식을 얻을 수 있었다.

$$f_{rsm} = 402.89 - 46.02A + 785.04B - 30.88D - 1.69E + 12.42A^2 + 117.42B^2 + 0.72D^2 + 0.01E^2 - 34.24AB + 0.91AD - 0.04AE - 23.16BD - 0.41BE + 0.02DE \quad (6)$$

$$S_{rsm} = 37.795 - 5.357A + 8.765B - 1.757D - 0.174E + 1.182A^2 - 4.106B^2 + 0.032D^2 + 0.002E^2 \quad (7)$$

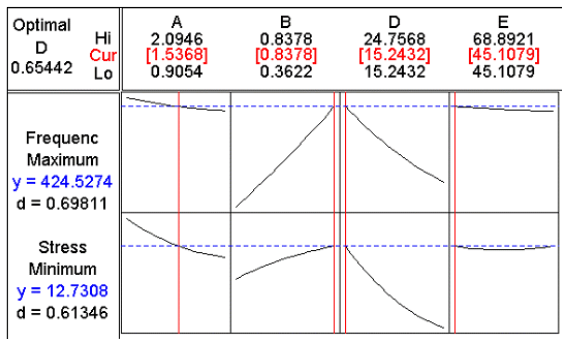


Fig. 4 The optimal values and the predicted response trace plots along the control factors

Fig. 4는 제어인자 사이의 최적값과 예측값들을 나타내고 있다. 유효응력과 1차 고유진동수의 가중치는 각각 1로 선택하였다. 그 결과 각 인자들 힌지의 반경(A), 힌지의 두께(B), 수직 압의 길이(D) 및 수평 압의 길이 (E)의 최적값은 각각 1.5368mm, 0.8378mm,

15.2432mm 및 45.1079mm로 나타났다. 나머지 인자들은 유효응력과 1차 고유 진동수에 그다지 유효하지 않은 것으로 나타났고 B, D 가 반응값에 가장 큰 영향력이 있는 것으로 나타났다.

Table 5는 간단한 이론식, 유한요소법과 반응표면 분석법에 의해서 만들어진 2차 회귀방정식에 의한 결과들을 나타내었고 모두 유사함을 알 수 있다.

Table 4 Estimated regression coefficients for frequency and stress

Run	Full				Redefined			
	Coef.	P	Coef.	P	Coef.	P	Coef.	P
Co.	213.61	0	8.8801	0	214.52	0	8.9109	0
A	-3.36	0	-0.453	0	-3.36	0	-0.453	0
B	38.78	0	0.3838	0	38.78	0	0.3838	0
C	0.34	0.122	0.011	0.64	-	-	-	-
D	-26.42	0	-0.958	0	-26.42	0	-0.958	0
E	-1.2	0	0.0065	0.782	-1.2	0	0.0065	0.782
F	0.12	0.592	-0.0007	0.975	-	-	-	-
A*A	0.82	0	0.0759	0.001	0.76	0.001	0.0738	0.001
B*B	1.22	0	-0.039	0.06	1.16	0	-0.041	0.045
C*C	0.03	0.875	0.006	0.764	-	-	-	-
D*D	2.93	0	0.1298	0	2.87	0	0.1278	0
E*E	0.33	0.085	0.0405	0.052	-	-	0.0385	0.06
F*F	0.58	0.004	0.0237	0.243	-	-	-	-
A*B	-0.86	0.002	0.0084	0.757	-0.86	0.006	-	-
A*C	0.1	0.694	-0.006	0.828	-	-	-	-
A*D	0.46	0.08	0.0472	0.093	-	-	-	-
A*E	-0.05	0.834	-0.02	0.473	-	-	-	-
A*F	0.39	0.127	0.0291	0.292	-	-	-	-
B*C	-0.03	0.91	0.0109	0.689	-	-	-	-
B*D	-4.63	0	-0.05	0.078	-4.63	0	-	-
B*E	-0.21	0.418	-0.009	0.74	-	-	-	-
B*F	-0.81	0.003	0.0647	0.024	-	-	-	-
C*D	0.18	0.471	0.0172	0.53	-	-	-	-
C*E	0.13	0.595	0.0378	0.174	-	-	-	-
C*F	-0.05	0.838	-0.023	0.394	-	-	-	-
D*E	0.22	0.379	0.0047	0.864	-	-	-	-
D*F	0.02	0.928	0.0159	0.56	-	-	-	-
E*F	0.02	0.922	-0.015	0.591	-	-	-	-

Table 5 The results from SDM, FEM, RSM applied optimal values

	Simplified design	FEM simulation	Regression model by RSM
Frequency [Hz]	424.20	422.19	424.53
Stress [MPa]	-	12.53	12.73

4. 결 론

이 연구의 목적은 초정밀 위치결정 기구에 장착되는 장비 중의 하나인 마이크로 스테이지의 설계에 관한 연구이다. 마이크로 스테이지의 설계에 영향을 주는 인자들은 각각 힌지의 반경, 힌지의 두께, 스테이지의 두께, 수직 압의 길이, 수평 압의 길이 그리고 압 사이의 틈새로 결정했다. 이들 중 힌지의 반경, 힌지의 두께, 수직 압의 길이가 상대적으로 힌지에 발생하는 유효응력과 스테이지가 가지는 1차 고유 진동수에 영향을 많이 주는 것으로 나타났으며, 힌지의 두께와 수직 압의 길이가 반응값에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

유효응력과 1차 고유진동수를 얻기 위하여 유한요소해석을 수행하였고, 반응표면분석법의 중심합성법을 이용하여 2차 회귀방정식을 얻었다. 그리고 힌지를 탄성체, 압과 이송테이블을 강체라고 가정을 하여 이론식을 구하고, 이들의 값들을 비교한 결과 이론적으로 구한 식의 결과, 유한요소해석결과 그리고 반응표면분석법에 의한 이차회귀방정식의 결과가 모두 유사함을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 동의대학교가 지원하는 교내연구(2004년), 산업자원부·한국산업기술평가원 및 부산광역시가 지원하는 동의대학교 전자세라믹스센터(ECC)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, Chang Hong, "Ultra-precision Positioning Technology," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 9-15, 2000.
2. Kim, Seung Woo, "Design and Control of Nano-Precision Machine Systems," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 13-17, 2002.
3. Ryu, J. W. and Gweon, D. G., "Error analysis of flexure hinge mechanism induced by machining imperfection," J. of Precision Engineering, Vol. 21, No. 2/3, pp. 83-89, 1997.
4. 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.
5. Vaughan, M. E., "The Design, Fabrication, and Modeling of a Piezoelectric Linear Motor," M. S. Thesis, State University of Virginia, 2001.
6. Ye, S. D., Jeong, J. H. and Min, B. H., "A Study on Design and Manufacture of an Inchworm Linear Motor System," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 174-181, 2004.
7. Smith, S. T. and Chetwynd, D. G., "Foundations of Ultraprecision Mechanism Design," Gordon and Breach Science Publishers, 1992.
8. Myer, R. H. and Montgomery, D. C., "Response Surface Methodology," John Wiley & Sons, Inc., pp. 297-340, 1995.