

마이크로 스테이지의 유한요소해석

김재열*, 짝 이구**, 한 재호***, 김 항우***, 下河辺明****

A Study on the Optimal Structural Design using FEM for Micro Stage

Jae-Yeol Kim*, Lee-Ku Kwac**, Jae-Ho Han***, Hang-Woo Kim***, Akira Shimokohbe****

ABSTRACT

For optimal design of micro stage, we measured the displacement of piezoelectric transducer that was based on voltage value. And the micro stage was analyzed using FEM with displacement data including voltage value of piezoelectric transducer. For verification of analysis results, the displacements were measured by using Laser-interferometer. And researchers confirmed to propriety on design of micro stage with FEM, we obtained 3.5% error rate between measurement results and analyzing results.

Key Words : Piezoelectric transducer(압전소자), FEM(유한요소해석), Micro stage(초미세 스테이지), Ultra Precision(초정밀), Laser interferometer(레이저 간섭계)

1. 서론

21 세기는 반도체, 초정밀 가공, 정보기기 분야의 발달로 인하여 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하게 되었다. 이러한 서브마이크론의 위치정밀도는 기존의 액추에이터로는 구현하기가 어려워 최근에 형상기억 합금, 정전 액추에이터 보이스코일 모터 등 새로운 원리를 이용한 액추에이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 압전소자에 대한 연구도 이러한 흐름으로 볼 수가 있다.

압전소자(PZT)는 전기적인 에너지를 다른 변환장치 없이 바로 기계적인 운동으로 바꾸어 주므로 위치제어에 적합한 소자이며, 고속 및 고성능응답

특성을 지니고 있어 초정밀 위치결정기구의 액추에이터로서 좋은 특성을 지닌다. 이러한 압전소자를 활용하여 초정밀 위치결정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

본 논문에서는 힌지구조를 갖는 마이크로 스테이지를 설계하고자 하며, 제작에 앞서 압전소자의 특성을 고려한 모델을 제시하고 유한요소해석 기법을 적용하여 마이크로 스테이지의 특성을 해석한 후 실험을 통하여 그 결과를 검증하고자 한다.

2. 본론

· 2001년 11월 9일 접수
* 조선대학교 기계공학부
** 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
*** 충원대학 자동차과
**** 日本東京工業大學 精密工學研究所

2.1 마이크로 스테이지의 구성

초정밀 위치결정 시스템에서 사용되는 마이크로 스테이지는 일반적으로 압전소자를 사용하게 되는데, 일반적으로 사용되는 구조는 자벌레 방식(Inchworm type), 마찰구동 방식(Friction drive type), 탄성힌지 방식(Flexure hinge type)으로 나누어 진다. 마찰구동방식은 압전소자의 전단변형이나 튜브방식의 구조를 이용하여 긴 이동거리를 갖고 있으나 구동시 비선형성에 대한 모델링이 어려운 단점을 가지고 있다. 자벌레방식의 경우 압전소자를 길이 방향으로 적층하여 동작시키는 구조로 긴 이동거리를 쉽게 구현할 수 있으나 제어계가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾

본 연구에서 사용된 탄성힌지 방식의 경우 사용된 재료의 탄성변형 범위 내에서 사용하여야 하므로 사용범위가 제한되며, 충격에 약한 단점을 지니고 있으나 부드럽고 선형적인 동작이 가능하며, 응답속도가 빠르며, 마찰이 없는 구조이므로 내마모성이 우수하다. 또한 안전성, 제어성, 정밀도 측면에서 타방식에 비하여 우수한 특성을 지니고 있다.

마이크로 스테이지에 적용된 탄성힌지 방식은 기하학적으로 대칭 구조를 가지며 운동 방향에는 유연(Flexible) 하지만 다른 방향에 대해서는 견고한(Rigid) 성질을 지니고 있다. 탄성힌지 방식은 힌지가 운동방향에 대하여 가이드하면서 동작하게 되므로 힌지의 설계가 마이크로 스테이지의 특성을 지배하게 되는 중요한자이다.

탄성 힌지를 설계할 때 가장 유의해야 할 사항은 힌지의 강성이며, Paros 와 Weisbord 에 의해

$$K_b = \frac{E_p t^2}{20R^2} \tag{1}$$

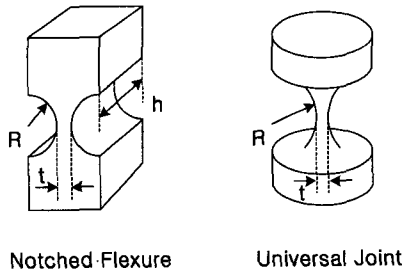


Fig. 1 Flexure hinge

제안된 식으로 탄성 힌지 설계 시 많이 쓰여지고 있다. 이에 대한 이론은 식 (1)과 Fig. 1 에 나타내었다.⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾

본 연구에서 설계한 탄성힌지는 와이어 커팅이 쉽고 온도에 따른 열변형을 최소화하기 위하여 듀랄루민(Duralumin)을 사용하였고 마이크로 스테이지는 ± 10 μm의 변위를 갖도록 하며, 자중에 의한 처짐은 20nm 이하가 되도록 힌지를 설계하였다. 마이크로 스테이지는 압전소자 구동기와 직접 체결되어 스테이지의 강성은 압전소자 강성에 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 힌지의 강성과 압전소자의 강성을 고려하여 대칭적으로 설계하고 기구학적으로 가이드 역할을 하도록 한다.

본 연구에서는 THORLABS 사의 AE1010D16 PZT 액츄에이터를 활용하여 마이크로스테이지의 변위 제어시 최소 10 nm의 분해능을 가지도록 설계하고자 하며, PZT 액츄에이터의 특성은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 AE1010D16 PZT Performance

Maximum Displacement	Generation Force	Maximum Driving Voltage	Resonant Frequency
18.4± 3.5 μm	3500 N	150 V.DC	69 kHz

2.2 유한요소 모델링

유한요소해석 모델링은 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC 사의 MENTAT 를 활용하였으며, 해석은 MARC 를 사용하였다.⁽⁸⁾

Fig.2 는 본 연구에 사용된 마이크로 스테이지의 3 차원 모델이며, 특히 힌지부분에 대해서는 상세 요소분할을 실시하였다. 모델의 크기는 37,634 개의 절점(Nodal points)과 17,160 개의 3D Solid 요소 (Elements)로 모델링 하였다. 압전소자의 전압 가진부위에 절점변위를 가하였으며, 마이크로 스테이지 중심점에서의 변위 이동량을 검토하였다.⁽⁹⁾

마이크로 스테이지에 적용된 경계조건은 스테이지의 외곽은 고정되었으며, PZT 가 놓여지는 부분(Fig. 3 의 ㉓와 ㉔)에 집중하중을 가하게 된다. 또한, 재료에 따른 변위분해능을 파악하고자 알루미늄과 듀랄루민의 두 가지 재료를 사용하여 상호 비교하였다. 본 연구에서 이용된 마이크로 스테이

지의 재료에 대한 물성(material property)은 Table 2 와 같다.

Table 2 Material property

material	Young's modulus	Poisson's ratio	Mass density	Yield strength
Aluminum	7,200	0.34	2.7×10^{-6}	2.04
Duralumin	6,700	0.35	2.6×10^{-6}	7

※ unit : kg f/mm² for modulus and strength

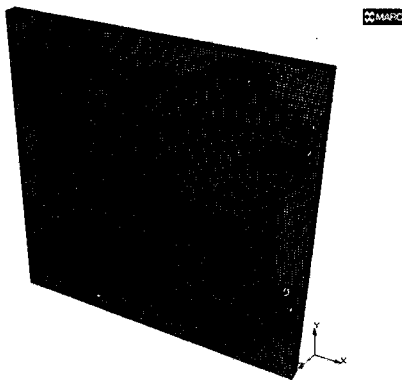


Fig. 2 FEM model for Micro Stage

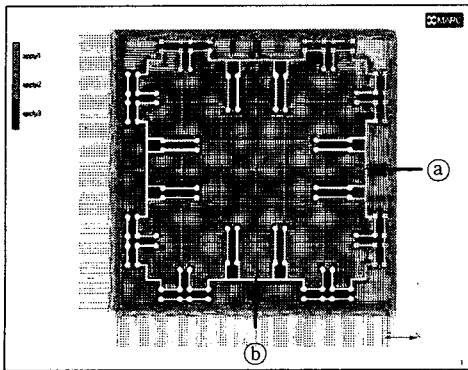


Fig. 3 Boundary Conditions

2.3 유한요소 해석결과 및 분석

본 연구에서 유한요소해석 적용 목적은 압전 소자(PZT)에서 발생되는 힘과 변위를 미동스테이지에 작용하였을 경우 마이크로 스테이지내에서 검출되어지는 변위 분해능을 파악하고자 한다. 또한, 압전소자에 의한 최대 힘과 변위 작용시 마이크로 스테이지의 힌지부분(Fig. 4 의 part "A")에서의

crack 발생여부를 판단하고자 한다. 따라서, 마이크로 스테이지의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석 결과는 아래와 같다.

상기 Fig. 4 는 압전소자에서 발생하는 최대 힘과 변위에 대한 마이크로 스테이지의 전체적인 변형을 나타내고 있으며, Fig. 5 에서는 힌지부분(part "A")의 변형상태를 1,000 배로 확대하여 보여준 것이다. 압전소자에 의한 마이크로 스테이지의 최대 변위가 검출되는 부분은 중앙위치이며 여기에서 검출되어지는 변위를 좌우와 상하방향에 대해 curve 로 나타내었다. 가로축의 증분(incrment)은 압전소자의 최대 작용힘(3,500N)을 10 등분으로 나누어 가한 경우 각각의 검출변위를 보여주고 있다.

Fig. 6 에서와 같이 검출되어지는 변위값의 범위는 최대 1/100mm(100 μm)까지 검출이 가능하다.

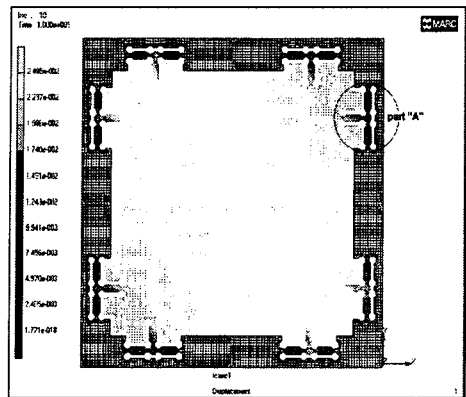


Fig. 4 Deformation of UPPA

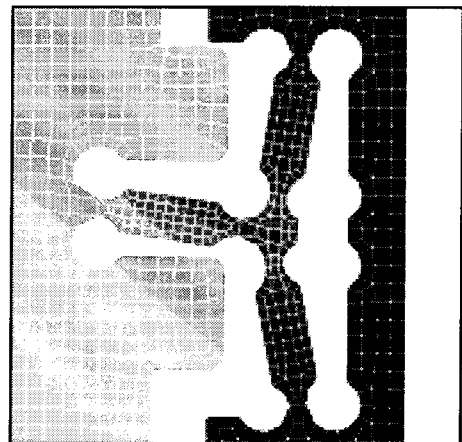


Fig. 5 Detailed Deformation for part "A"

Fig. 7 에서는 압전소자에 최대변위와 힘을 발생시켜 마이크로 스테이지에 전달할 경우 마이크로 스테이지에서 발생하는 등가응력 분포를 나타내었으며, Fig. 8 은 Fig. 7 의 part "B" 부분에 대한 상세 분포이다. Fig. 8 을 검토해 본 결과 part "C"에서 응력 집중 현상이 나타나며, 최대 등가응력은 5.981 kg/mm²으로 나타나 항복강도의 1.5%에 지나지 않아 마이크로 스테이지의 crack 우려는 전혀 없다.

또한, 마이크로 스테이지의 재질에 따른 최대

Table 3 Results of displacement and stress

Material	Maximum Displacement	Maximum Mises stress
Aluminum	0.01684mm	5.891 kg/mm ²
Duralumin	0.01671mm	5.465 kg/mm ²

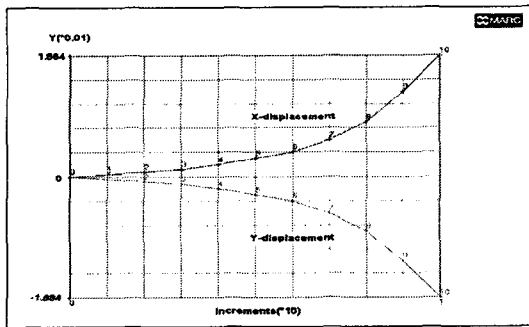


Fig. 6 Deformation Variation on Center Point of UPPA

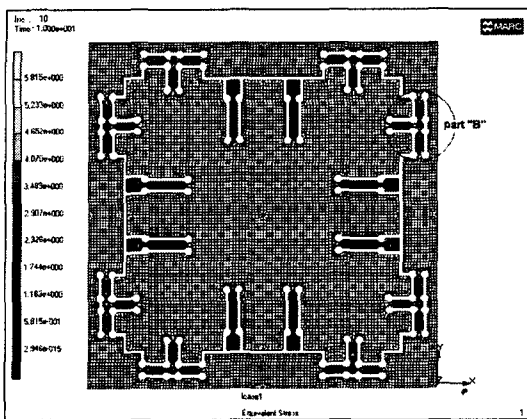


Fig. 7 Von-Mises Stress Distribution of UPPA

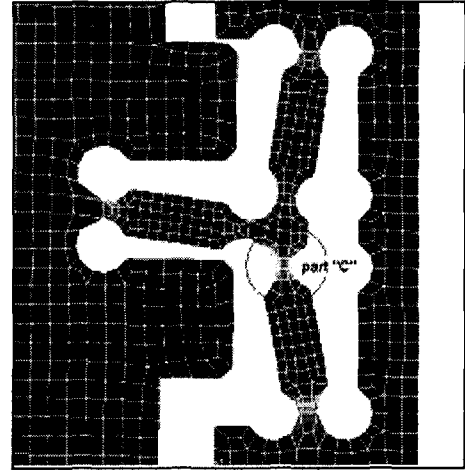


Fig. 8 Detailed Von-Mises Stress Distribution on part "B"

변위와 최대 등가응력의 결과치는 다음 Table 3 과 같다.

2.4 실험장치 구성

본 연구에서 설계한 마이크로 스테이지의 초정밀 위치결정을 위한 변위측정 센서로는 레이저 인터페로미터(Renishaw ML10)를 사용하였으며, 제어 시스템으로는 DSP Board(dSPACE ds1103)를 이용하였다.

본 연구에서 설계한 마이크로 스테이지의 시스템의 개략도와 전체 시스템 사진은 Fig. 9 와 Fig. 10 에 보여주고 있다.

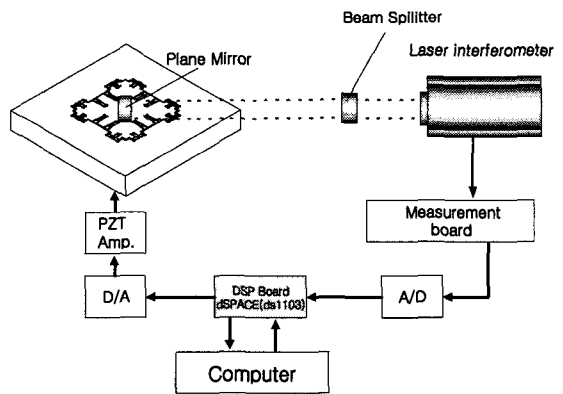


Fig. 9 Schematic Diagram of Ultra Precision Positioning System

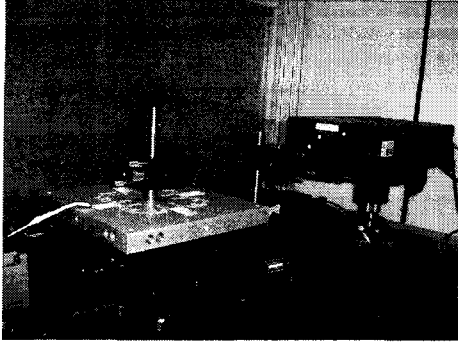


Fig. 10 Photograph of Ultra Precision Positioning System

2.5 실험 및 고찰

본 연구에서는 압전소자(PZT)에 0V~100V 의 전압을 주어서 발생하는 변위를 레이저 인터페로미터로 측정하였으며, 이 데이터를 압전소자의 탄성계수를 감안하여 유한요소 3D 모델에 적용 해석하였다. 이때 3D 유한요소 모델의 중심점에서 변화되는 변위를 실제 마이크로 스테이지의 변위와 비교하여 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 압전소자의 탄성계수는 $1.37 \times 10^7 \text{N/m}$ 이다.

Fig. 11 은 압전소자, 유한요소해석, 마이크로 스테이지의 히스테리시스 곡선과 유한요소해석값 대 마이크로스테이지의 히스테리시스 편차값을 도시한 그래프이며, Table 4 는 이에 대한 데이터 값이다.

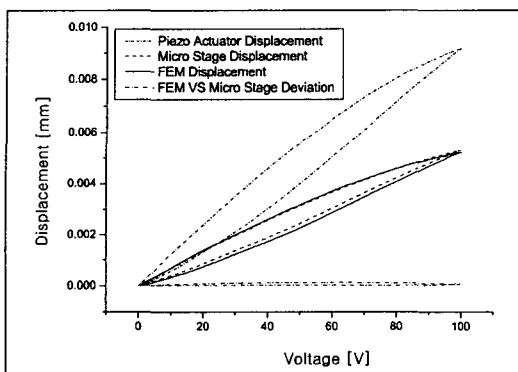


Fig. 11 Hysteresis curve of Piezo Actuator, FEM and Micro Stage, Deviation curve of FEM vs Micro Stage

Fig. 11 에서 나타낸 바와 같이 FEM 결과와 실제 마이크로 스테이지를 구동하였을 때의 변위결과가 유사하게 출력되었음을 알 수 있었으며, 이것의 오차값은 3.53% 였다. 따라서 본 연구에서 수행한 유한요소해석의 타당성을 검증하였으며, 이러한 유한요소해석과 실제 마이크로 스테이지 구동시의 결과값 비교에서 볼 수 있듯이 신뢰성을 갖는 최적의 모델을 설계 할 수 있었다.

위와 같은 유한요소해석과 마이크로스테이지의 구동을 통해서 본 시스템의 히스테리시스 곡선은 Fig. 12 와 같이 나타났으며, 측정 데이터로부터 최소자승법을 사용하여 최소자승 선분을 구하였다. 그리고 이러한 최소자승선분은 초정밀 위치제어를 할때 중요한 기본 데이터로 사용된다.

이러한 유한요소해석과 실험은 초정밀위치제어를 하기 위한 기본적인 과정이며 시행착오를 줄이기 위한 것이다.

Table 4 Data of Piezo Actuator, FEM and Micro Stage, Deviation of FEM vs Micro Stage

입력전압	PZT 변위 (μm)	스테이지 변위(μm)	FEM 변위(μm)	FEM:스테이지 편차(μm)
0	0	0	0	0
10	0.563	0.389	0.320	0.04880
20	1.290	0.843	0.731	0.07930
30	2.110	1.340	1.200	0.09900
40	3.020	1.880	1.720	0.11300
50	4.000	2.450	2.280	0.12000
60	5.050	3.040	2.870	0.12000
70	6.120	3.640	3.470	0.12000
80	7.180	4.220	4.080	0.09900
90	8.230	4.790	4.680	0.07780
100	9.180	5.300	5.210	0.06360
90	8.700	4.980	4.940	0.02830
80	8.070	4.580	4.590	0.00707
70	7.340	4.150	4.170	0.01410
60	6.510	3.670	3.700	0.02120
50	5.590	3.140	3.170	0.02120
40	4.590	2.580	2.610	0.02120
30	3.510	1.970	1.990	0.01410
20	2.380	1.330	1.350	0.01410
10	1.200	0.662	0.681	0.01340
0	0	0	0	0.00000

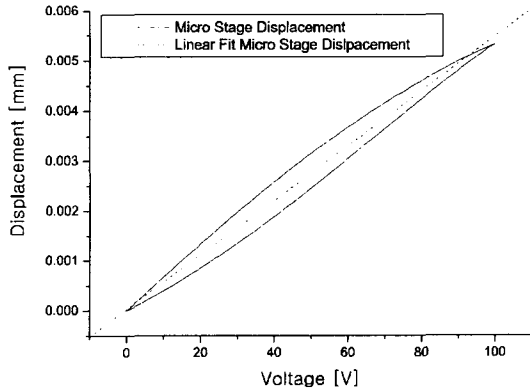


Fig. 12 Hysteresis of Micro Stage and Liner Fit

3. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 마이크로 스테이지 설계의 타당성을 검증하고자 하였다. 압전소자의 특성에 따른 마이크로 스테이지의 변위와 유한요소 해석을 통한 결과를 비교하기 위하여, 전압의 변화에 따른 압전소자의 변위를 측정하여 유한요소해석시 변위 데이터를 입력하였다. 또한 유한요소 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 레이저 인터페로미터를 이용한 변위측정 시험을 실시하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

첫째로 최대 100V의 전압을 압전소자에 인가하였을 때 압전소자의 최대 변위는 9.18 μm 로 나타났으며, 이를 이용한 유한요소해석 결과 마이크로 스테이지의 중심 변위가 5.21 μm , 실제 시스템에서는 5.30 μm 의 변위가 나타남에 따라, Fig.11의 결과와 같이 유한요소해석 결과와 실험결과의 부합함을 확인하였다.

둘째로 FEM 해석 데이터와 실제 마이크로 스테이지를 구동 하였을 때 변위의 오차값은 3.53%로, 일반적으로 유한요소해석 적용시 공학적 활용이 가능한 오차율 미만이므로 본 연구에서 사용한 유한요소해석 방법의 타당성을 확인하였다.

셋째로 유한요소해석기법을 적용하여 분석한 결과, 마이크로 스테이지의 최적설계 및 최소자승 선분을 도출하였다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2002년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Simokohbe 외 2인, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods," 日本 精密工學誌 Vol. 64, No. 11, pp. 1627-1632, 1998.
2. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems," Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J 07632, pp. 689-699, 1994.
3. 이창우, "이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3 자유도 위치제어," 박사학위 논문, 한국과학기술원, pp. 28, 1997.
4. H. Nakazawa, "Principles of Precision Engineering," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 75-82, pp. 140-167, 1994.
5. S. T. Smith and D. G. Chetwynd, "Foundation of Ultra- Precision Mechanism Design," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95-128, 1992.
6. Kaiji SATO 외 5인, "Performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Method(2nd Report)," 日本 精密工學誌 Vol. 63, No. 12, pp. 1759-1763, 1997.
7. 김재열, 윤성훈, 한재호, 광이구, 김향우, "유한요소법을 이용한 초정밀 미동스테이지 설계에 관한 연구 (I)," 정밀공학회 춘계발표논문집, 2001.
8. MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.
9. Thomas J. R. Hughes, "The Finite Element Method," Prentice-Hall International Editions, pp. 90-91, 1987.
10. D. Keith Bowen, "Development in Nanotechnology," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 95-129, 1992.
11. 김정용, 이병룡, 안순용, 안경관, "역 히스테리시스 모델을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어," 한국정밀공학회 2001 추계학술논문집, pp. 349-352, 2001.