

마이크로 스테이지의 유한요소법을 이용한 최적설계와 초정밀 위치제어에 관한 연구

김재열(조선대 기계공학부), 한재호(조선대 대학원)*, 김항우(송원대 자동차과)
유신(목포 과학대), 곽이구(조선대 대학원), 송인석(조선대 대학원)

A Study on the Optimal Structural Design and Ultra Precision Position Control using FEM for Micro Stage

J. Y Kim(Mech. Eng. Dept., CSU), J. H Han*(Graduate School, CSU), H.W Kim(Auto. Eng, SWC)
S.You(MSC), L. K Kwac(Graduate School, CSU), I.S Song (Graduate School, CSU)

ABSTRACT

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

Key Words : Piezo-electric transducer(압전소자), FEM, Micro stage

1. 서론

21세기는 반도체, 초정밀 가공, 정보기기 분야의 발달로 인하여 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하게 되었다. 이러한 서브마이크론의 위치정밀도는 기존의 액츄에이터로는 구현하기가 어려워 최근에 청상기억 합금, 정전 액츄에이터 보이스코일 모터 등 새로운 원리를 이용한 액츄에이터에 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 위치 제어에 적합한 소자이며, 고속 및 고성능응답특성을 지니고 있어 초정밀 위치결정기구의 액츄에이터로서 좋은 특성을 지닌다. 이러한 압전소자를 활

용하여 초정밀 위치결정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

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

2.1 유한요소 정식화⁽⁵⁾

본 연구에서 이용된 유한요소해석 기법은 3차원 요소(3-D Solid Element)를 이용하였으며, 물성특성(Material property)으로는 탄성체로 고려하여

해석하였다. 또한, 압전소자에서 가해지는 힘은 하나의 점으로 간주하여 집중하중을 작용시켰다. 이러한 문제의 특성을 고려한 유한요소 수식은 다음과 같다.

$$\widehat{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\widehat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \psi_x^T & 0 & 0 \\ 0 & \psi_y^T & 0 \\ 0 & 0 & \psi_z^T \\ 0 & \psi_z^T & \psi_y^T \\ \psi_z^T & 0 & \psi_x^T \\ \psi_y^T & \psi_x^T & 0 \end{bmatrix} (\psi_x \ \psi_y \ \psi_z) = \frac{1}{2} \widehat{A} \widehat{\psi}$$

$$\begin{aligned} \psi_x^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial x} \right], \\ \psi_y^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right], \\ \psi_z^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial z} \quad \frac{\partial v}{\partial z} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \right]. \end{aligned}$$

$$d\widehat{\varepsilon} = \frac{1}{2} d(\widehat{A} \widehat{\psi}) = \frac{1}{2} d\widehat{A} \widehat{\psi} + \frac{1}{2} \widehat{A} d\widehat{\psi} = \widehat{A} d\widehat{\psi}$$

형상함수 N 과 절점 매개변수 \hat{a} 의 항으로 변위 $\widehat{\psi}$ 를 나타내면 $\widehat{\psi} = \widehat{G} \hat{a}$, $d\widehat{\varepsilon} = \widehat{A} \widehat{G} d\hat{a}$ 와 같다. 이때, 변형률행렬 B 는 다음과 같이 표현된다.

$$B = \widehat{A} \widehat{G}$$

$$\widehat{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

또한, 재료의 물성에 대한 행렬 D 는 E 와 ν 는 탄성체의 영률과 포아슨비로 다음과 같이 나타낸다.

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

따라서, 응력 $\widehat{\sigma}$ 와 변형률 $\widehat{\varepsilon}$ 와의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = D \widehat{\varepsilon}$$

따라서, 임의의 3차원 요소에 대한 강성행렬과 유한요소해석 정식(Finite Element Formulation)은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$k^e = \int_{V^e} B^T D B dV^e$$

$$f^e = k^e \hat{a}$$

여기에서, f^e 는 작용력 벡터(Applied or Reaction Force vector), k^e 는 요소 강성행렬(Element stiffness matrix)이며, \hat{a} 는 절점의 매개변수 벡터(Nodal displacement variables vector)를 나타낸다.

2.2 유한요소 모델링⁽⁶⁾

유한요소해석 모델링은 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC사의 MENTAT를 활용하였으며, 해석은 MARC를 사용하였다. 마이크로 스테이지에 적용된 경계조건은 스테이지의 외곽은 고정되었으며, 압전소자가 놓여지는 부분에 압전소자의 변위를 변화시키면서 가하게 된다. 본 연구에서 이용된 마이크로 스테이지의 재료에 대한 물성(material property)은 표.1과 같다

Table 1 Material property

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

* units : kgf/mm² for modulus and strength

그림1은 본 연구에 사용된 마이크로 스테이지의 3차원 모델이며, 특히 힌지부분에 대해서는 상세 요소분할을 실시하였다. 모델의 크기는 37,634개의 절점(Nodal points)과 17,160개의 3D Solid 요소(Elements)로 모델링하였다. 압전소자의 전압가진 부위에 절점분리를 가하였으며, 마이크로 스테이지 중심점에서의 변위 이동량을 검토하였다.

그림 2는 압전소자의 변위를 최대로 주었을때의 힌지부분에서 발생하는 변위량을 500배로 확대한 결과이며, Part "A"에서 가장 큰 변형을 보이고 있어 향후 피로파괴의 주요부분으로 예상된다.

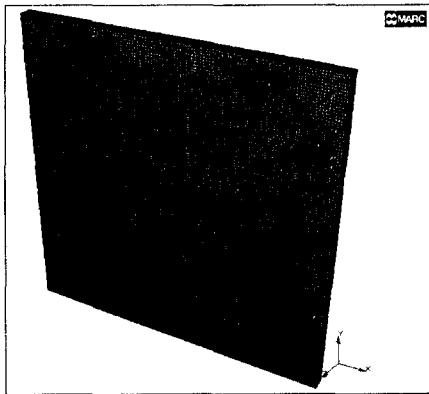


Fig.1 FEM model for Micro Stage

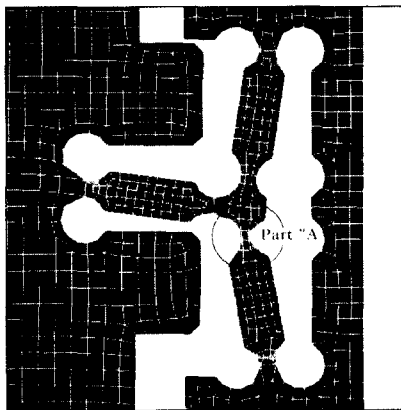


Fig.2 Maximum displacement for Micro Stage

2.3 실험장치 구성

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

본 연구에서 설계한 마이크로 스테이지의 사진은 Fig.3에 보여주고 있으며, Fig.4와 Fig.5는 본 시스템의 개략도와 전체 시스템 사진이다.

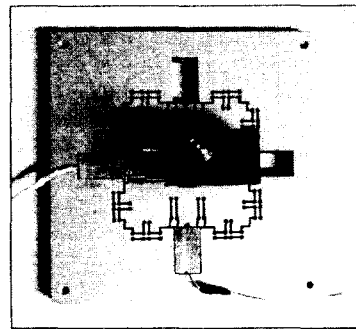


Fig.3 Photograph of Micro Stage

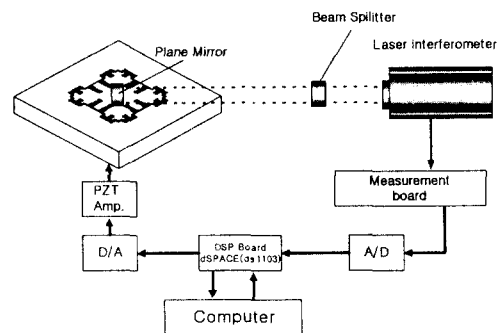


Fig.4 Schematic Diagram of Ultra Precision Positioning System

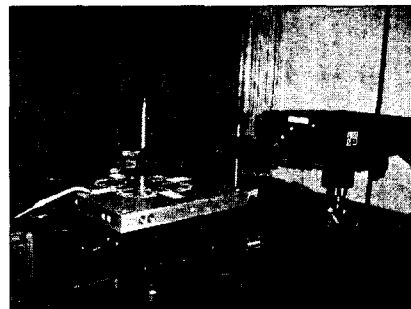


Fig.5 Photograph of Ultra Precision Positioning System

2.4 유한요소 해석결과 및 분석

본 연구에서는 압전소자(PZT)에 0V ~ 100V의 전압을 주어서 발생하는 변위를 레이저 인터페로미터로 측정하였으며, 이 데이터를 유한요소 3D 모델에 적용 해석하였다. 이때 3D 유한요소 모델의 중심점

에서 변화되는 변위를 실제 마이크로 스테이지의 변위와 비교하여 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

Fig.6은 압전소자, 유한요소해석, 마이크로스테이지의 히스테리시스 곡선과 유한요소해석값 대 마이크로스테이지의 히스테리시스 편차값을 도시한 그래프이며, Table 2는 이에 대한 데이터 값이다.

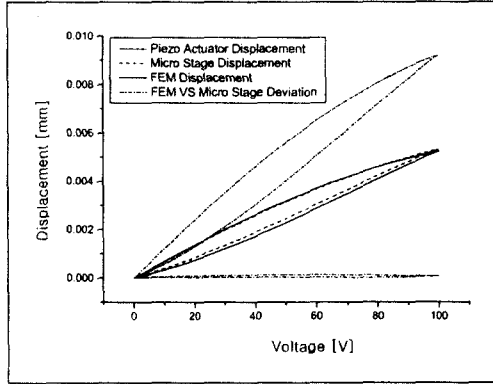


Fig.6 Hysteresis curve of Piezo Actuator, FEM and Micro Stage, Deviation curve of FEM vs Micro Stage

Table 2 Data of Piezo Actuator, FEM and Micro Stage, Deviation of FEM vs Micro Stage

입력 전압	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	0.0488
20	1.290	0.843	0.731	0.0793
30	2.110	1.340	1.200	0.0990
40	3.020	1.880	1.720	0.1130
50	4.000	2.450	2.280	0.1200
60	5.050	3.040	2.870	0.1200
70	6.120	3.640	3.470	0.1200
80	7.180	4.220	4.080	0.0990
90	8.230	4.790	4.680	0.0778
100	9.180	5.300	5.210	0.0636
90	8.700	4.980	4.940	0.0283
80	8.070	4.580	4.590	0.00707
70	7.340	4.150	4.170	0.0141
60	6.510	3.670	3.700	0.0212
50	5.590	3.140	3.170	0.0212
40	4.590	2.580	2.610	0.0212
30	3.510	1.970	1.990	0.0141
20	2.380	1.330	1.350	0.0141
10	1.200	0.662	0.681	0.0134
0	0	0	0	0

Fig.6에서 나타낸바와 같이 FEM 결과와 실제 마이크로 스테이지를 구동하였을 때의 변위결과가 유

사하게 출력되었음을 알 수 있었으며, 이것의 오차 값은 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.

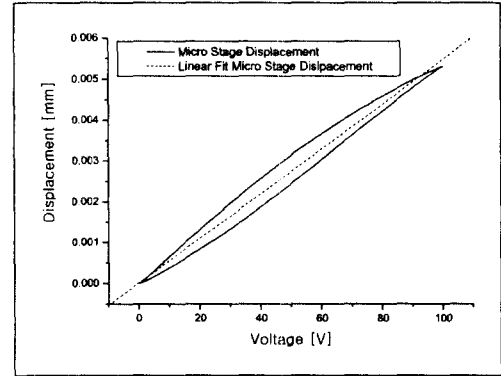


Fig.7 Hysteresis of Micro Stage and Linear Fit

위와 같은 유한요소해석과 마이크로스테이지의 구동을 통해서 본 시스템의 히스테리시스 곡선은 Fig.7과 같이 나타났으며, 측정 데이터로부터 최소자승법을 사용하여 최소자승 선분을 구하였다. 그리고 이러한 최소자승선분은 조정밀 위치제어를 할 때 중요한 기본 데이터로 사용된다.

이러한 유한요소해석과 실험은 조정밀 위치제어를 하기 위한 기본적인 과정이며 시행착오를 줄이기 위한 것이다.

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 μ m의 변위가 나타남에 따라, 그림 6의 결과와 같이 유한요소해석 결과와 실험결과의 부합함을 확인하였다.

둘째로 FEM해석 데이터와 실제 마이크로 스테이지를 구동 하였을때 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.

참고문헌

1. Simokohbe 외2인, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", 日本 精密工學誌 vol. 64. No. 11, p.1627~1632, 1998.
2. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems" Prentice Hall. Englewood Cliffs. N. J 07632, p689~699, 1994
3. Kaiji SATO외 5인, "Performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Methode(2nd Report)", 日本 精密工學誌 vol. 63. No. 12, p.1759~1763, 1997
4. 김재열, 김영석, 박이구, 마상동, 한재호, "초정밀서보기구의 제어성능 평가(II)", 정밀공학회 춘계발표논문집, 2000
5. Thomas J. R. Hughes, "The Finite Element Method" Prentice-Hall International Editions , p90~91, 1987.
6. MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.