

유한요소법을 이용한 초정밀 미동스테이지 설계에 관한 연구 (I)

김재열(조선대 기계공학부), 윤성운(조선대 기계공학부), 김향우(송원대 자동차과)
한재호(조선대 대학원)*, 곽이구(조선대 대학원)

A Study on the Design of Ultra Precision Positioning Apparatus using FEM (I)

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

ABSTRACT

Because, Piezo-electric transducer(PZT) transform electric energy into mechanical energy, it is a adequate material for positioning control and force control, take excellent properties as actuator with high speed and high performance. Recently, researches of ultra precision positioning using this PZT are advanced in.

In this paper, we use a actuator of PZT, design a positioning apparatus with ultra precision position apparatus as hinge structure. Because of this purpose, before, we were confirmed in control properties of ultra precision stage by FEM method

Key Words : Piezo-electric transducer(압전소자), FEM, Ultra precision positioning apparatus, Simulation,

1. 서론

최근 반도체 제조장차, 초정밀 공작기계, 정밀기기 등의 분야에서 끊임없이 고정도화, 고정밀화가 진행되어, 이러한 분야의 위치결정기술은 현재 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하고 있으며, 2000년대 초의 가공정밀도는 정밀가공분야에서 10 nm, 초정밀가공분야에서는 1nm의 수준까지 도달 할 것으로 예상되어지고 있다. ^{(1)~(3)}

따라서, 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 액츄에이터의 소형화, 고정밀도화가 필요하나 기존의 공, 유압 액츄에이터, 또는 전기적 액츄에이터로는 서브 마이크로 이하의 정밀도를 얻기 힘들고 소형화하기 힘들다. 따라서 최근에 형상기억 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 전기적 신호를 직접 기계적인 힘 또는 운동으로 바꾸어 주므로 위치체이나 힘 제어를 위하여 적합한 물질이며 고속, 고성능의 액츄에이터로서 좋은 특성을 가진다. 현재 이러한 압전소자를 활용한 초정밀 위치결정기구에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 압전소자를 액츄에이터로 사용하고 한지구조의 초정밀 스테이지(UPPA:Ultra Precision Positioning Apparatus)를 장착한 위치결정기구를 설계하고자 시 제작에 앞서서 유한요소해석 기법을 이용하여 초정밀 스테이지의 제어능력을 파악하고자 하였으며, 그 과정과 결과를 언급하였다.

2. 본 론

2.1 초정밀 미동 스테이지의 설계

본 연구에서는 THOR LABS사의 AE1010D16 PZT 액츄에이터를 활용하여 미동스테이지의 변위 제어시 최소 10nm의 분해능을 가지도록 설계하고자 하며, PZT 액츄에이터의 특성은 표1에 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

초정밀 미동스테이지 설계시 정확한 동작을 실현하기 위해서는 굽힘 힌지 부분의 설계가 중요하다. 특히 굽힘 힌지 요소 설계시 중요한 인자는 강성이다. 그림 1은 Paros와 Weisbord에 의해 제안된 미동스테이지 굽힘힌지의 설계작업시 사용모델이며 굽힘강성은 식(1)에 의해 구할 수 있다.

$$K_B = \frac{Et^{\frac{7}{2}}}{20R^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{사각형의 노치가 있는 경우}) \quad (1)$$

여기에서 E는 young's modulus, t는 노치폭, h는 노치 두께, R은 노치의 반경을 나타내고 있다.

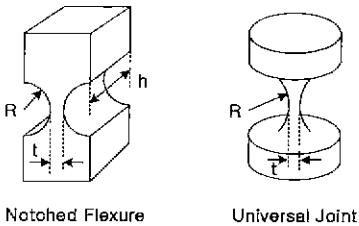


Fig.1 Flexure Hinge

초정밀 미동스테이지는 X,Y 축방향으로 최대 100μm, 사용영역 ± 10μm의 변위를 갖도록 하며 자중에 의한 처짐은 0.02μm이하가 되도록 힌지를 설계하였다. 미동 스테이지는 압전소자 구동기와 직접 체결되며 미동스테이지의 강성은 압전소자 강성에 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 힌지는 강성에 중점을 두지 않고 대칭적으로 설계하여 기구학적으로 가이드 역할만 하도록 하였다. Paros와 Weisbord에 의해 제안된 힌지구조 중 가공편의성을 고려하여 Notched Flexure 구조로 그림 2와 같이

설계하였다.

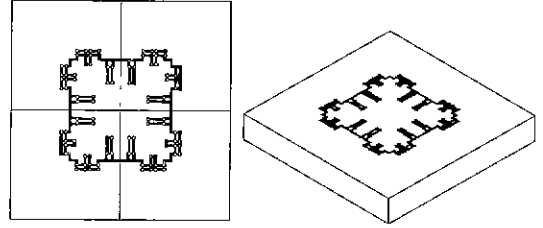


Fig. 2 Design of Ultra Precision Positioning Apparatus

2.2 유한요소 정식화⁽⁵⁾

본 연구에서 이용된 유한요소해석 기법은 일정한 두께를 지닌 평면응력(Plane-stress) 요소를 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.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$E = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} n_x & 0 & n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}, \quad \hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_x \\ \hat{\sigma}_y \end{bmatrix}$$

여기에서, σ_y 는 응력 성분이며, ϵ_y 는 변형을 성분을 나타낸다. E와 ν 는 탄성체의 영률과 포아손 비를 표시하고, D는 행렬연산자, n_x 와 n_y 는 2차원 문제에 있어서 영역 Ω 의 경계 $\partial\Omega$ 에 대한 단위 벡터 성분이다. u와 f는 단위면적당 작용하는 Body force이며, $\hat{\sigma}$ 는 경계의 임의 부분 Ω_2 에 작용하는 traction 벡터를 의미한다. 임의 영역 Ω 에서의 정적평형방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{\omega} (D^T \sigma + f) dx dy = 0$$

만약, σ 와 f가 smooth하다고 가정한다면 물체의 평형에 대한 편미분 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$D^T \sigma(x, y) + f(x, y) = 0, (x, y) \in \Omega$
 선형 탄성체 재료에 대한 연속체 방정식은 등방체로 가정하여 $\sigma = E\varepsilon$ 로 나타낼 수 있으며, 변형율과 변위관계는 $\varepsilon = Du$ 로 나타낸다. 이를 상기 식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$D^T E D u(x, y) + f(x, y) = 0, (x, y) \in \Omega$$

$\partial \Omega$ 의 일부분 $\partial \Omega_2$ 에 대한 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N\sigma = \hat{\sigma} \text{ 또는 } N E D u(s) = \hat{\sigma}(s), s \in \partial \Omega_2$$

$\partial \Omega_1$ 에 대한 변위 경계조건은 다음과 같다.

$$u(s) = \hat{u}(s) = \begin{bmatrix} \hat{u}_x \\ \hat{u}_y \end{bmatrix}, s \in \partial \Omega_2$$

만약, 변위가 v 라 하면, 변위벡터 u 는 다음과 같이 정의되며, 이를 가상일의 원리(Principle of virtual work)라 한다. 이때, $u_x, u_y \in H^1(\Omega)$,

$\partial \Omega_1$ 상에서 $u = \hat{u}$ 이다.

$$\int_{\Omega} (Dv)^T E D u dx dy = \int_{\Omega} v^T f dx dy + \int_{\partial \Omega_2} v^T \hat{\sigma} ds.$$

$$v \in \hat{H}^1(\Omega)$$

임의의 요소에 대한 가상일의 원리를 적용하여 유한요소의 해를 구하여 보면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega_e} (D v_h^e)^T E D u_h^e dx dy = \int_{\Omega_e} v_h^e{}^T f dx dy + \int_{\partial \Omega_e} v_h^e{}^T (N\sigma) ds$$

여기서, $u_h^e(x, y) = \Psi^e(x, y) u^e$ 로 나타내며, Ψ_i^e 는 임의의 요소 Ω_e 의 형상함수이다.

$$\Psi_1^e(x, y) = \begin{bmatrix} \Psi_1^e(x, y) & 0 & \Psi_2^e(x, y) \\ 0 & \Psi_1^e(x, y) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Psi_2^e(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & \Psi_3^e(x, y) & 0 \\ \Psi_2^e(x, y) & 0 & \Psi_3^e(x, y) \end{bmatrix}$$

$$\Psi^e(x, y) = [\Psi_1^e(x, y) \quad \Psi_2^e(x, y)]$$

$$(u^e)^T = \{ u_{x_1}^e, u_{y_1}^e, u_{x_2}^e, u_{y_2}^e, u_{x_3}^e, u_{y_3}^e \}$$

따라서, 임의의 평면응력요소에 대한 유한요소해석 정식(Finite Element Formulation)은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$k^e u^e = f^e + \hat{\sigma}^e$$

$$k^e = \int_{\Omega_e} (D\Psi^e)^T E D\Psi^e dx dy$$

$$f^e = \int_{\Omega_e} (\Psi^e)^T f dx dy$$

$$\hat{\sigma}^e = \oint_{\partial \Omega_e} (\Psi^e)^T N\sigma ds$$

여기에서, k^e 는 요소 강성행렬(element stiffness), f^e 는 요소에 작용하는 단위 면적당 Body force vector, $\hat{\sigma}^e$ 는 요소의 경계에 작용되는 traction vector를 각각 나타낸다.

2.3 유한요소 모델링⁽⁶⁾

유한요소해석 모델링은 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC사의 MENTAT를 활용하였으며, 해석은 MARC를 사용하였다. 미동스태이지에 적용된 경계조건은 스테이지의 외곽은 고정되었으며, PZT가 놓여지는 부분(그림3의 ㉠와㉡)에 집중하중을 가하게 된다. 또한, 제질에 따른 변위분해능을 파악하고자 알루미늄과 듀랄루민의 두 가지 재료를 사용하여 상호 비교하였다. 본 연구에서 이용된 미동스태이지의 재료에 대한 물성(material property)은 표.2와 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 : kgf/mm² for modulus and strength

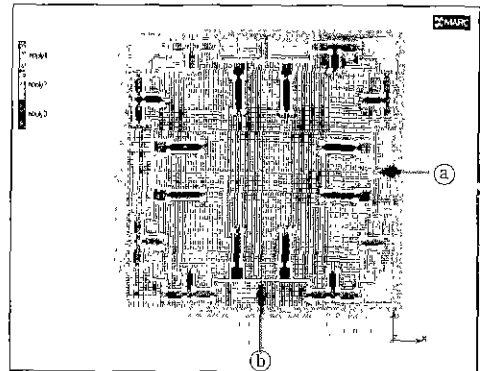


Fig.3 Boundary Conditions

2.4 유한요소 해석결과 및 분석

본 연구에서 유한요소해석 적용 목적은 압전소자(PZT)에서 발생하는 힘과 변위를 미동스태이지에 작용하였을 경우 미동스태이지내에서 검출되어지는 변위 분해능을 파악하고자 한다. 또한, 압전소자에 의한 최대 힘과 변위 작용시 미동스태이지의 힌지

부분(그림4의 part "A")에서의 crack 발생여부를 판단하고자 한다. 따라서, 미동스테이지의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석 결과는 아래와 같다.

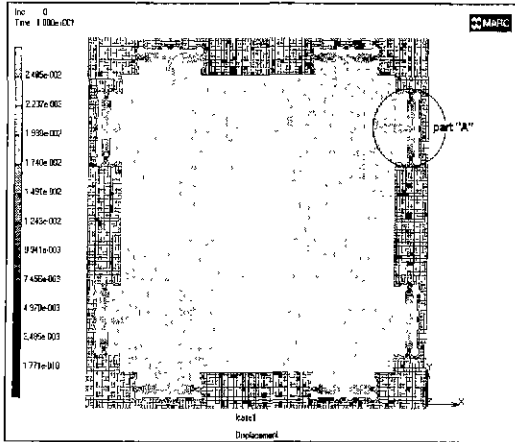


Fig.4 Deformation of UPPA

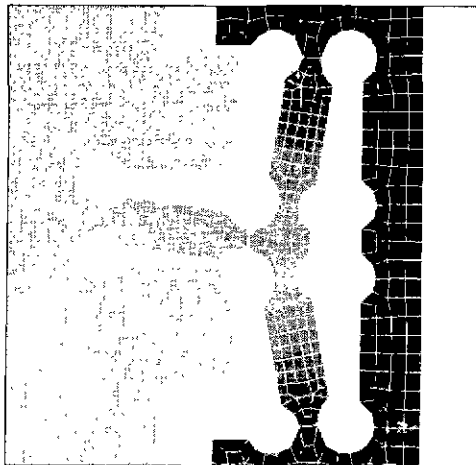


Fig.5 Detailed Deformation for part "A"

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

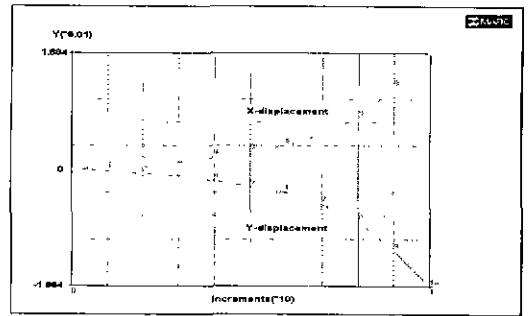


Fig.6 Deformation Variation on Center Point of UPPA

상기 그림6에서와 같이 검출되어지는 변위값의 범위는 최대 1/100mm(100μm)까지 검출이 가능하다.

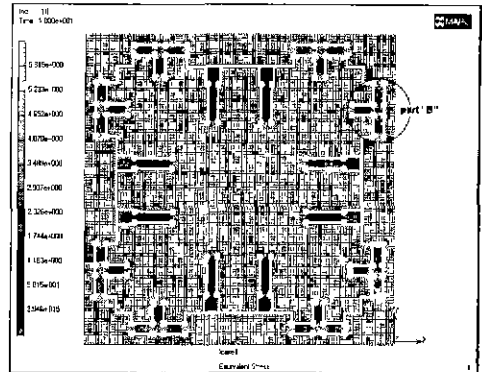


Fig.7 Van-Mises Stress Distribution of UPPA

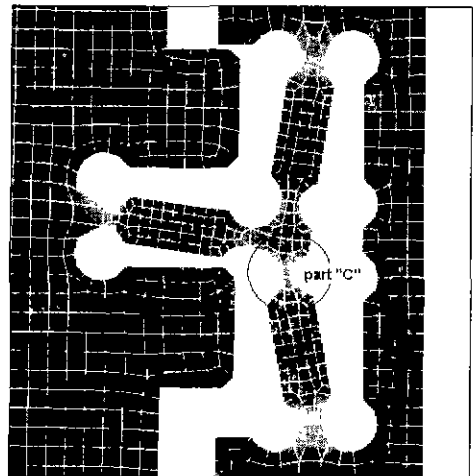


Fig.8 Detailed Van-Mises Stress Distribution on part "B"

그림7에서는 압전소자에 최대변위와 힘을 발생 시켜 미동스테이지에 전달할 경우 미동스테이지에서 발생하는 등가응력 분포를 나타내었으며, 그림8은 그림7의 part "B" 부분에 대한 상세 분포이다. 그림8을 검토해 본 결과 part "C"에서 응력집중 현상이 나타나며, 최대 등가응력은 5.981kg/mm²으로 나타나 항복강도의 1.5%에 지나지 않아 미동스테이지의 crack 우려는 전혀 없다.

또한, 미동스테이지의 재질에 따른 최대 변위와 최대 등가응력의 결과치는 다음 표.3과 같다.

Table 3 Results of displacement and stress

Material	Maximum Displacment	Maximum Miscs stress
Aluminum	0.01684mm	5.891kg/mm ²
Duralumin	0.01671mm	5.465kg/mm ²

3. 결론

본 연구에서는 THOR LABS社의 PZT를 이용한 초정밀 미동 스테이지 설계의 타당성을 유한요소법을 이용하여 검증하고자 하였으며, PZT에서 발생하는 힘과 변위가 미동스테이지에 전달될 경우 미동스테이지에 검출되는 변위를 파악하여 미동스테이지에 사용될 PZT 액츄에이터의 제어계를 구성할 기본 자료로 활용하는데 그 목적이 있다. 이러한 미동스테이지의 변위 검출능력을 판단하고자 할 경우 시제품에 의한 시험결과를 이용하여야 하나 시험비용 및 시간을 고려하여 유한요소해석기법을 적용하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째로, 압전소자에 의한 미동스테이지의 변위는 최대 100 μ m 이내로 본 연구에서 행하고자 하는 변위제어 범위에 부합됨을 알 수 있었다.

둘째로, 압전소자에 의해 발생하는 힘과 변위에 대해 미동스테이지의 최대 등가응력은 재료의 항복강도에 대해 1.5%에 지나지 않아 crack 발생의 우려는 거의 없음을 알았다.

셋째로, 설계한 미동스테이지에 유한요소해석기법을 적용하여 분석한 결과, 미동스테이지 설계의 타당성과 안전성을 입증하였다.

후기

본 발표논문은 2001년 과학기술부지원 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며. (사)산업자원부

TIC 장비를 활용하였다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

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. 김제열, 김영석, 박이구, 마상동, 한재호, "초정밀서보기구의 제어성능 평가(II)", 정밀공학회 춘계발표논문집, 2000
5. Eric B. Becker, Graham F. Carey. J. Tinsley Oden, "Finite Elements An Introduction" Vol.1 Texas Institute for Computational Mechanics, The University of Texas at Austin, p242~245.
6. MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.