

대변위 고속 Scanning 을 위한 플렉서 기반 2 축 스테이지 설계 및 제작

An Design Method for the Flexure-guided Stage for the Long-stroke Scanning

*이상원¹, 정영대², 박민규³, 김창환¹, #이호¹

*S.W. Lee¹, Y. D. Jung², M. K. Parak³, C. H. Kim¹, #H. Lee(Holee@knu.ac.kr)¹

¹ 경북대학교 기계공학부, ² 한국연구재단, ³ 영남이공대학 기계과

Key words : Flexure-guided Micro-stage

1. 서론

최근 마이크로/나노 가공기술은 급속도로 발전되고 있으며, 이와 함께 초정밀 위치결정 기구를 사용하는 다양한 응용이 시도되고 있다. 대표적인 응용사례로 Atomic Force Microscopy(이하 AFM)을 비롯하여, 반도체 제조 및 검사장비들을 들 수 있다. 이상의 응용 분야 등에서 생산성과 효율성을 높이기 위해 고속 이송 능력에 대한 필요성과 대면적의 이동범위, 고정밀도, 고강성 등이 요구되고 있다. 앞서 말한 계측장비들은 샘플이 위치하게 되는 스테이지를 이용하여 직접 스캐닝 방식을 채택하고 있으며, 탄성힌지(hinge) 혹은 판스프링(leaf spring)을 기본 구성요소로 하는 플렉서(flexure)를 압전소자 등을 이용해 샘플이 위치하고 있는 Moving Mass 를 움직여서 초정밀 구동하는 방식이다.

본 논문은 AFM stage 의 대변위 적용뿐만 아니라, Confocal Scanning Microscopy 등의 스캐닝 방식의 현미경에 적용이 가능하도록 플렉서 기반의 초정밀 구동 Scanner 를 개발하려고 한다. 변위 증폭 레버를 이용하여 최대 변위 250 μ m 를 가지면 20Hz 의 반복 구동이 가능한 스테이지를 설계하였다. 제작 이전단계에 설계된 스캐너의 성능을 평가하기 위해 FEM 을 이용하여 Stress 및 Modal Analysis 를 수행하여 의도된 성능을 만족하는지에 대해 확인하였다.

2. Scanner 설계 및 해석

본 연구에서 제작한 대변위 Scanning 을 위한 플렉서 기반의 2 축 Stage 는 변위 증폭 레버구조와 Leaf Spring 의 탄성 복원구조를 기반으로 하고 있으며, Fig. 1 에 개략도를 소개 한다. 네 개의 판스프링을 기본요소로 하는 이중 복합(Double Compound) 구조를 선택하여 높은 탄성력과 동적 안정성을 확보하였고, 지렛대원리를 이용한 변위증폭구조를 도입하였다. 또한 큰 회전반경에 따른 기생운동의 감소를 위해 레버와 Moving Mass 을 강철 핀(Pin)을 이용하여 분리(Decoupling)시켰다.

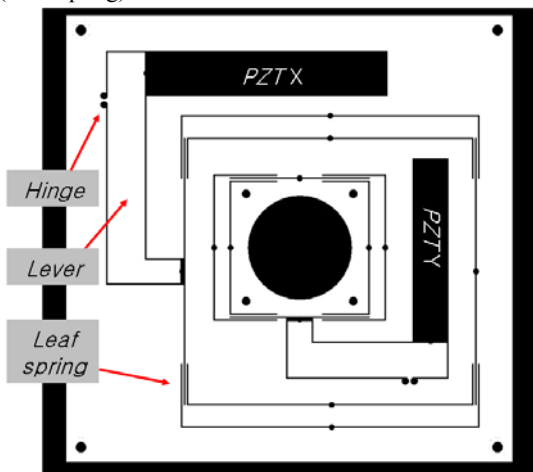


Fig. 1 Schema of 2Axis-Scanning stage with lever & leaf spring

Moving Mass 는 Stage 의 중심부에 위치를 하며, 저속 Scanning 을 위한 X 축 및 고속 Scanning 을 위한 Y 축은 각

각 한 개의 압전소자 구동기, 네 개의 Leaf Spring 과 증폭을 위한 Lever 와 Hinge 로 구성되어 있다. 저속의 구동부가 Stage 의 외각에 위치하고 있으며 고속의 구동부는 Stage 의 안쪽에 배치되어 있다. X 축 및 Y 축의 구동부는 완전히 Decoupled 되어서 구현되었다.

Table 1 Design Parameter

Parameter	Designed	Unit
Total size	150(W)×150(L)×50(H)	mm
Working range	250	μ m
Repetition Rate	20	Hz

본 연구에서 개발한 Stage 의 설계사양은 Table. 1 과 같이 설정하였다. Scanner로서의 기능 향상 및 소형화를 위해 크기를 150×150 mm로 제한하였으므로, 최대 변위는 판매되고 있는 상용제품의 최대치에 근사한 250 μ m 로 설정하였다. 제한된 크기의 Scanner 를 설계하기 위해 최적설계과정이 필수적이다. 설계된 Stage 의 각 축을 굽힘(Deflection)을 고려하지 않을 경우 Fig. 2 와 같이 간단한 Spring, Mass, 및 Lever 로 구성된 복합체로 모델링 할 수 있다.

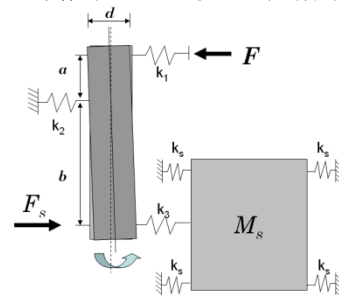


Fig. 2 Simplified schematic model of the single axis(x) of the stage

증폭비(Magnification ratio)를 α 라 두고 지렛대 원리를 이용하면 다음과 같이 수식으로 간단하게 강성(k), Moment 와 여러 외력을 표현할 수 있다.

$$k_3 = 4k_s \text{ ----- (1)}$$

$$\sum M_{k2} = aF = bF_s = \text{constant} \text{ ---- (2)}$$

$$F_s = aF/b = F/\alpha \text{ ----- (3)}$$

그러나 Fig. 2 에서 k_2 로 표시된 Hinge 와 레버에서 변형 또는 굽힘이 크게 발생하게 되면 구동부의 비선형적인 거동으로 인해 Stage 에 작용하는 외력, 강성 및 변위 등의 관계를 수식 (1)-(3)과 같이 간단한 선형 방정식으로 표현하기는 적당하지 않다.

본 개발에서는 Lever 의 굽힘과 Hinge 변형의 최소화를 설계의 주요한 기준으로 적용을 하였다. 스프링 요소와 레버 설계로 나누어 변형 및 굽힘의 최소화와 Stage 의 공진 주파수, 최대 변위, 구동 주기 등을 고려하여 설계를 수행하였으며 PTC 사의 Pro-Engineer™ Wildfire 4 를 이용한 FEM 해석을 통해서 주요 요소들을 설계하였다.

2.1 스프링 요소 설계

시스템의 공진 주파수는 수식(4)과 같이 Effective Stiffness 와 Effective Mass 로 결정되며 이 공진 주파수는 스프링 요소

소의 설계에서 Scanner 의 동적 성능을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나이다[1].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_{eff}}} \quad \text{-----} \quad (4)$$

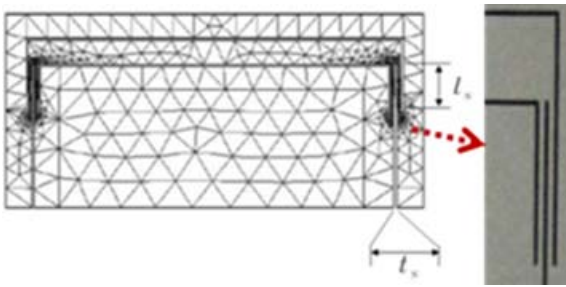


Fig. 3 Kinematic diagram of double compound mechanism using leaf springs

또한 스프링의 Stiffness 는 압전소자 구동기의 Blocking force 와 더불어서 Stage 의 최대변위와 공진주파수를 결정한다. 스프링 요소는 Fig. 3 와 같이 Leaf spring 으로 표현이 가능하며 Leaf spring 의 Stiffness 는 길이(\$l_s\$), 와 두께(\$t_s\$)에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 Wire-cut EDM 의 정밀도를 0.05mm 로 간주하였으며, X 축과 Y 축의 Stiffness 를 100, 50 으로 목표치로 설정하여 설계를 진행하였다. 반복해석을 통한 각 설계요소들의 결과를 Table. 2 에 정리하였다.

Table 2 Optimal design of spring elements

	Length (ls)	Thickness (ts)	Stiffness (N/mm)	1st modal (Hz)
X-axis	14mm	0.50mm	98.2	115
Y-axis	16mm	0.45mm	50.0	223

2.2 레버 요소 설계

레버의 설계에 있어서 Hinge 의 형태는 Fig. 4 와 같이 모델링할 수 있으며, 일반적으로 식 (5)의 조건하에서 Hinge Neck 두께(t)와 지름(2R)을 설계한다[2]. 본 개발에서는 Hinge Neck 두께의 최소화를 위해 t/2R 을 0.2 로 선정하였으며 2R 을 경험에 의해 2.5mm 로 설정하였다[3].

$$0.2 < t/2R < 0.5 \quad \text{-----} \quad (5)$$

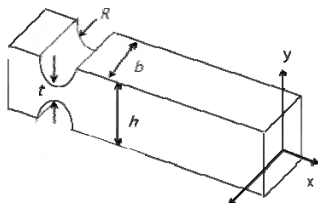


Fig. 4 Modeling of a flexure hinge for the magnification using a lever

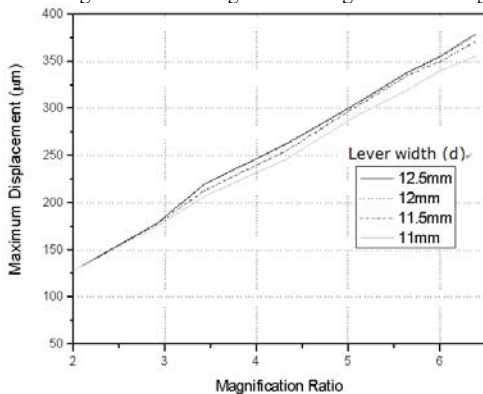


Fig. 5 Effect of bending on the maximum displacement according to magnification ratio

본 연구에서 목표된 최대 변위를 구현하기 위해 압전소자 구동기의 변위(증폭 전의 변위)를 60µm 로 선정할 경우, Lever 의 증폭비(\$\alpha\$)와 Lever 의 폭(\$d=11, 11.5, 12, 12.5mm\$)에

따른 최대변위의 시뮬레이션 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 증폭비 3 이상에서 레버의 폭에 관계없이 굽힘이 일어나며, Lever 폭(\$d\$)이 12mm 에서 12.5 로 증가 하여도 굽힘의 완화도는 크게 향상되지 않는 것을 고려하여 레버의 폭을 12.5 선정하였다.

3. 해석결과

이상의 각 요소들의 설계치를 Stage 에 반영하여 제작에 앞서 상용 시뮬레이션 프로그램(Pro-Engineer/Mechanica™)을 통해서 최대변위와 응력 및 Modal 해석을 하였습니다.

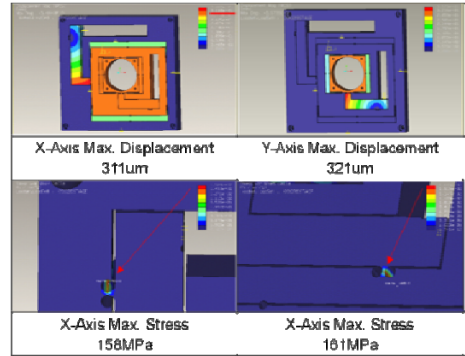


Fig. 6 Displacement & Stress Analysis results of the stage

Fig. 6 의 결과에서 최대변위는 60µm 변위 입력 시 X 축, Y 축 각각 311µm 와 321µm 가 나왔으며, 최대 응력은 Hinge 에서 발생하였으며, Stage 재질 Al6061-T6 의 항복응력 276MPa 의 약 58% 정도이다. 1 차~4 차 공진 주파수는 Fig. 7 의 결과와 같으며 가장 낮은 1 차 공진 주파수 72.58 Hz 도 구동주기 20Hz 를 벗어나 있다.

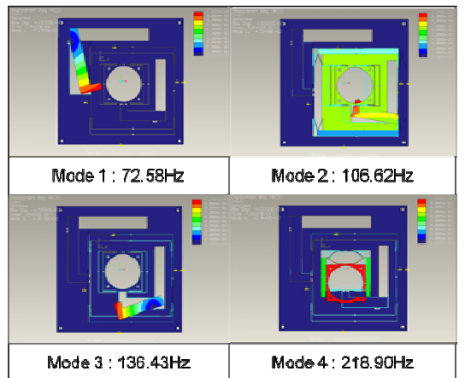


Fig. 7 Modal analysis results of the stage

4. 결론

본 연구에서 변위 증폭 구조와 Leaf-spring 의 탄성복원력을 이용한 이중 복합구조를 가진 2축 Flexure Stage 를 설계하고 해석하였다. 제작된 Stage 는 250µm 이상의 대변위와 20hz 이상의 Repetition Rate 를 가지며, AFM, CSM 등의 Scanner 및 제어를 통한 초정밀 스테이지로 활용가능 할 것이다.

후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술평화원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Dong-Yeon Lee, Dae-Gab Gweon, "An Education Model of a Nano-Positioning System for Mechanical Engineers," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 10, pp1702~1715, 2006.
2. Eun joo Hwang, Kyung Shin Hyung Song, Il Hyuk Ahn, Woo Chun Choi, "Optimal Design of a Flexure-Hinge Precision Stage with a Lever", Journal of Mechanical Science and Technology, 21, 616~623, (2007)
3. Wei Xu, Tim King, "Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations" Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, 4-10, 1996.