

4절 링크 구조를 응용한 플렉서 힌지 기반 모듈러 나노포지셔너 Modularized Flexure-Hinge Nanopositioner Based on Four-Bar-Link-Mechanism

*채기운¹, 배진현², #정영훈²

*K. W. Chae¹, J. H. Bae², #Y. H. Jeong(yhjeong@kpu.ac.kr)³

¹ 한국산업기술대학교 지식기반 기술·에너지 대학원 기계시스템공학과,

² 한국산업기술대학교 기계공학과

Key words : positoining, nanopositioner, flexure hinge, multi-axis, module, piezo-stack-actuator, kinematic link

1. 서론

최근 나노공학 및 생명공학의 급속한 발전에 힘입어 nm 또는 sub-nm 수준의 분해능/정밀도를 가지는 위치결정(nano-positioning)에 대한 수요가 급격히 확대되고 있다. 이러한 nm 수준의 정밀도를 가지는 나노 위치결정기구는 반도체공정 장비[1], 디스플레이 장치 개발, 초정밀 광학 및 측정학[2], 나노/마이크로 공정 등 다양한 첨단 고부가 가치 분야에서 핵심적인 요소로 평가되고 있으며, 다양한 측면에서 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히, 산업계 각 분야에서 관련 기술 및 제품의 요구가 확대되고 있으나, 관련 제품이 국내 업계보다는 주로 관련분야의 선진국에 의해 제공되고 있으며, 국내에서의 연구 및 제품 개발은 상용화보다는 단편적인 요구에 맞춰져 있기 때문에 산업계의 이러한 요구를 만족시키기에는 충분하지 못하다. 또한 피에조 스택 구동기를 이용한 나노포지셔너와 관련한 기술의 산업계 보급의 문제와 동시에 현재까지의 기술은 실제 산업계에서 요구하는 수준에 비해 다소 좁은 이송범위의 문제점을 가지고 있어 이를 해결할 필요가 있다.

이러한 요구에 발 맞춰 학계 및 산업계에서는 나노 위치결정과 관련한 다양한 연구 및 개발을 수행하여 왔다. 그러나 상용화된 나노포지셔너는 매우 고가이며, 형상에서도 다양한 분야에서의 요구를 만족시킬 만큼 다양하지 못한 실정이다. 또한 나노 위치결정과 관련한 시장은 독과점적인 형태를 띠고 있기 때문에 그 발전 수준이나 산업계 전반으로 보급이 둔화되어 있는 구조를 가지고 있다.

본 연구에서는 국내의 나노 위치결정이 요구되는 다양한 분야에서 활용될 수 있는 모듈화 된 단축(1축)의 나노포지셔너를 개발하였다. 특히 본 연구에서 개발된 나노포지셔너는 단축의 나노포지셔너로서 조립유연성을 확보하여 조립을 통해 다양한 형태의 모션시스템으로 확장이 가능하도록 모듈화하였으며, 피에조 스택 구동기(piezo-stack-actuator)를 이용하여 플렉서 힌지를 기반으로 하여 sub-nm 수준의 초정밀 이송을 실현할 수 있고, 피에조 스택 구동기의 부착 위치 설정을 통해 포지셔너가 가지는 운동범위를 조절할 수 있도록 확대하여 피에조 스택 구동기에 비해 넓은 이송 범위 확보할 수 있도록 하였다.

2. 나노포지셔너 설계

나노포지셔너에 있어서 구조물이 가져야 하는 중요한 요건은 단축으로의 이송 시 의도되지 않은 타 방향으로의 이송이 없어야 한다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 직각 사각형형 구조의 4절 링크기구를 이용하였다.

본 연구에서는 나노포지셔너의 형상이 간결해질 수 있도록 피에조 스택 구동기를 4절 링크의 내부에 넣도록 하여 위치를 결정하였다[3]. 4절 링크기구는 일반적인 기하형상을 고려하는 기구학적 해석을 통해 그 거동을 쉽게 예측할 수 있다. 이때 링크의 길이는 늘어나거나 줄어들지 않는 것으로 가정하였으며, 플렉서 힌지는 굽힘 변형에 의한 회전 효과만을 가지는 것으로 가정하였다. 피에조 스택 구동기의 위치와 변위증폭비(구동기 변형량과 나노포지셔너 이송거리의 비)와의 관계는 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dx}{dLa} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dLa} = \frac{b \cdot La}{a \cdot d} = \frac{b}{c} \quad (1)$$

여기서 $a, b, c, \theta, dx, La, \overline{La}$ 는 링크와 강체 부분까지의 거리, 링크사이의 거리, 링크로부터 피에조 스택 구동기까지의 거리, 피에조 스택 구동기가 변형된 후 링크의 틀어짐각, 나노포지셔너의 이송거리, 변형 전 피에조 스택 구동기의 길이, 변형 후 피에조 스택 구동기의 길이이다. (1)을 통해 변위증폭비에 해당하는 피에조 스택 구동기의 위치를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 증폭비를 4로 결정하였다.

설계된 구조물의 기구학적 형상과 함께 플렉서 힌지의 형상을 결정해야 한다. 플렉서 힌지의 형상[4]은 링크기구 조인트의 스프링 계수와 관계되어 시스템 전체의 강성과 동특성에 가장 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 반원형 플렉서 힌지(right circular hinge)[4]를 이용하였으며 다양한 힌지의 폭과 직경에 대해 강성과 동특성을 조사하였으며, 최종적으로 0.8mm의 폭과 1.0mm의 직경을 가지도록 하였다.

결정된 힌지 형상을 가질 경우에 대해 강성과 동특성, 최대 변형량을 예측하기 위해 유한 요소법을 이용하여 변형해석을 수행하였다. 실제의 형상은 조립을 고려한 구멍들을 포함하고 있으나 특성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되어 해석에서 제외시켜 계산 속도를 높여 해석할 수 있도록 하였다.

강성설계는 나노포지셔너에 압전소자에 의해 힘이 주어질 때 그 변형 정도를 확인하여 구조물의 스프링 계수(강성)를 예측하는 것으로 압전소자의 사양 결정과 이후 시스

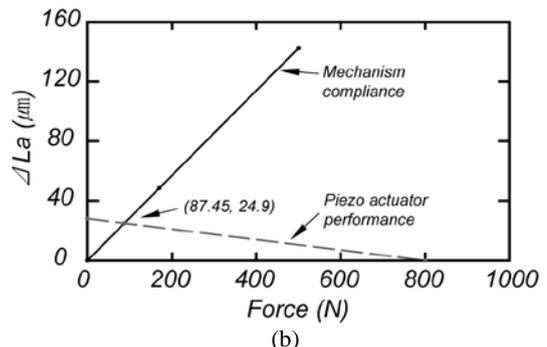
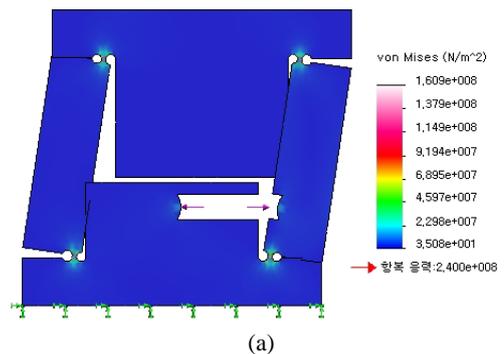


Fig. 1 Prediction of stress and deformation (a) and maximum elongation of piezo-stack actuator (b) using FEM analysis

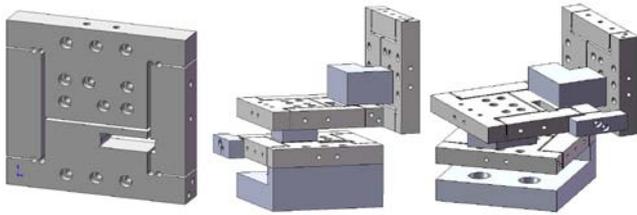


Fig. 2 Topological configurations using modular nanopositioner

템이 가질 수 있는 최대 변위량을 예측하는데 사용된다. 이를 위해 피에조 스택 구동기에 의해 다양한 힘이 주어졌을 때를 해석하였으며, 최종단의 변위를 예측하였다. Fig. 1 (a)에 보인 바와 같이 힘이 가해졌을 때 최대 응력은 힌지부에 존재하며, 대부분의 변형이 힌지부에 집중되어있음을 확인하였다. 또한 최종단 링크의 회전 및 측면방향 이송은 무시할 수 있는 범위에 있음을 확인하였다. Fig. 1 (b)는 다양한 부가 힘에 대한 나노 구조물의 변형량을 조사함으로써 나노포지셔너 구조물의 강성을 얻고, 이와 피에조 스택 구동기의 특성을 비교함으로써 대상 구조물과 선정된 피에조 스택 구동기를 이용할 경우의 피에조 스택 구동기의 최대 변형량 예측한 결과를 보여준다. 이로부터 나노포지셔너와 결합된 압전소자는 최대 24.9 μm 까지 늘어날 수 있음을 확인하였으며, 이때 필요한 힘은 87.45N 으로 시스템의 내구한도에 해당하는 힘 (85.3N)과 매우 유사하므로 수명의 큰 제한없이 최대 변위를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 피에조 스택 구동기로부터 87.45N의 힘이 가해질 때 구조물 최종단의 최대 이송량은 약 99.6 μm (변위 증폭비 \approx 4.0)까지 발생할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 2 에서 보인 바와 같이 분석한 내용을 바탕으로 조립을 위한 볼트 구멍을 결정하였다. 이때 2 단 조립에서 x-x 축, x-y 축, x-y'(45°) 축, 3 단 조립에서 x-y-z 축, 그리고 각각의 축에 원점이나 축의 방향을 다르게 설정할 수 있도록 설계하였다. 최종 설계된 나노포지셔너에 대해 수정된 형상에 따른 특성 변화를 확인하기 위해 강도 및 강성 해석 주파수 해석 등을 수행하였고, 확인결과 각 해석 결과는 앞에서 수행된 해석결과와 큰 차이가 없음을 확인하였다.

3. 나노포지셔너의 제작 및 제어

설계된 나노포지셔너를 실제 제작하여 검증하였다. 제작된 나노포지셔너의 재료는 SUS303 (Stainless Steel)으로 선정했고, 힌지 등 미세한 형상의 가공을 위한 와이어 방전 가공을 이용하였다. 이송량 측정을 위해 사용하는 용량형 변위 센서의 사용을 고려하여 센서 타겟은 거칠기에 의한 오차를 최소화 하기 위해 연마 처리되었다. Fig. 3 에 (a)는 x-y 의 2 축용 나노포지셔너 시스템의 조립결과를 보여주며, (b)는 성능검증을 위한 단축의 나노포지셔너 및 센서의 조립 형상을 보여준다. 이와 같이 단축 나노포지셔너가 다양한 형상으로 조립이 가능함을 확인할 수 있으며, 그 조립 형상은 커넥터의 변경에 의해 매우 다양해질 수 있다.

나노포지셔너의 동작을 위해 나노포지셔너 구조물, 센서, 피에조 스택 구동기, 제어기와 전압증폭기 등으로 이루어진 장치를 구성하였다. 특히 공기의 유동 및 온도의 급격한 변화 등 외부환경과의 단절을 위해 차단막을 설치하여 방진, 유동 차단 등의 효과를 얻었으며, 설딩을 통해 전기적 잡음도 최소화 할 수 있도록 하였다. 이송 제어는 Delta-Tau 사의 UMAC 을 이용하고 PID 제어를 이용하였다. 시스템의 입력은 위치가 되며, 피드백 신호는 변위센서로부터의 변위값으로 하였다. 제어 정확도는 센서의 특성으로부터 1 nm 이하 (0.5nm)의 분해능을 가지면서 2 nm 이하의 정밀도를 확보하도록 하였다. 변위는 50 μm 까지 10 μm 씩 증가시키면서 제어성능을 확인하였다.

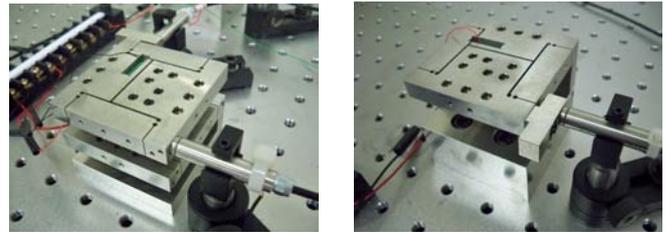


Fig. 3 Developed nanopositioners; (a) XY motion system, (b) single axis nanopositioner for experimental verification

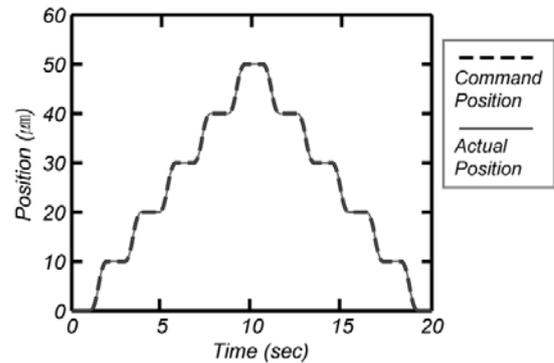


Fig. 4 Stepwise motion response of the single axis nanopositioner

구성된 나노포지셔너 시스템에 대한 이송성능평가를 위해 계단과 입력(stepwise motion input)이 주어졌을 때 응답을 확인하였다. Fig. 4 는 일정 전압을 주었을 때 나노포지셔너의 응답을 보여주는 것으로 명령값과 실제 포지셔너의 변위값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 조립을 통해 다양한 형태로 확장이 가능한 단축의 모듈러 나노포지셔너를 개발하였다. 개발된 나노포지셔너는 변위 증폭비 4 의 변위증폭비를 가지도록 하여, 60 \times 60 \times 10 mm의 크기를 가지며, 90 μm 이상의 이송 범위를 가지는 고강성 대변형 나노포지셔너이다. 200 Hz 의 공진주파수를 가지도록 설계되었으며, 조립연결부의 수정에 따라 400Hz 이상까지 확대가 가능한 구조가 되도록 하였다. 개발된 나노포지셔너의 성능검증을 위해 0.5 nm 분해능을 가지는 용량형 변위센서와 조립을 통해 높은 분해능을 확보하도록 하였으며, 이를 이용하여 계단응답실험을 수행하여 성공적인 이송성능을 가짐을 확인하였다.

후기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0071204).

참고문헌

1. Sugihara K, Mori I, Tojo T, Ito C, Tabata M, Shinozaki T, 1989, Piezo electrically driven XY Θ table for submicron lithography systems, Review of Scientific Instruments 60 3024-3029
2. Chen H T H, Ng W, England R L, 1992, Finite element analysis of a scanning X-ray microscope micropositioning stage, Review of Scientific Instruments 63 591-594
3. Dong J, Jeong Y H and Ferreira P M Design and analysis of a micro-positioning module for multi-degree-of-freedom micro-positioners, 2007 International Conference on Micromanufacturing
4. Paros J M, Weisbord L, 1965, How to design flexure hinges, Machine Design 37, 151-156