

4절 링크구조를 응용한 플렉서 힌지 기반 모듈형 나노포지셔너

Modularized Flexure-Hinge Nanopositioner Based on Four-Bar-Link-Mechanism

채기운¹, 배진현¹, 정영훈^{2,✉}
Ki Woon Chae¹, Jinhyun Bae¹ and Young Hun Jeong^{2,✉}

1 한국산업기술대학교 지식기반 기술·에너지 대학원 (Graduate School of Knowledge-Based Technology & Energy, Korea Polytechnic Univ.)

2 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

✉ Corresponding author: yhjeong@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0415

Manuscript received: 2010.11.1 / Revised: 2011.3.5 / Accepted: 2011.4.18

Nanopositioning technologies play an important role in the progress of electronics, optics, bio-engineering and various nano-scale technologies. As a result, various practical nanopositioning methods have been successfully introduced. Flexure mechanism is a valuable method in nanopositioning because of smooth and friction-free motion and the infinitesimal movement near to sub-nm. In this study a modularized nanopositioner based on parallelogram four-bar linkage structure with right-circular flexure hinge was developed. The positioning performance of a single axis nanopositioner and a XY nanopositioner which was extended from single axis one were demonstrated using control experiments. Consequently, it was shown that the developed single axis nanopositioner possessed high performance and could be extended to various multi-axis nanopositioners.

Key Words: Nanopositioner (나노위치결정기구), Flexure Hinge (플렉서 힌지), Piezo-stack Actuator (압전구동기), Parallelogram Linkage (평행사변형 링크구조)

1. 서론

최근 전자 및 반도체 기술, 생명공학, 광학, 나노공학 등 다양한 분야에서의 급속한 발전이 이뤄지고 있으며, 이러한 추세에 영향으로 nm 또는 sub-nm 수준의 분해능 및 정밀도를 가지는 위치결정(nanopositioning) 기술에 대한 수요도 급격히 증가하고 있다. nm 수준의 정밀도를 가지는 초정밀 위치결정기구는 반도체 공정¹을 비롯하여 박판 디스플레이 장치 제작 공정 장비, 초정밀 광학 장치,² NEMS 및 MEMS 공정 장비 등 정밀 산업계 전반에서 핵심적인 기술로 각광받고 있다. 이에 발맞춰 학계 및 산업계에서는 나노위치결정 기술과 관련된 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다.

또한 관련 기술의 선진국에서는 이와 관련한 다양한 나노위치결정기구(이하, 나노포지셔너)를 개발하여 상용화 하고 있다. 그러나 현재 나노위치결정 기술 시장은 높은 가격과 기술획득 및 시장진입이 제한되어 있는 상황으로 인해 산업계의 다양한 요구를 만족시키지 못하고 있다. 특히, 국내에서의 나노위치결정 기술의 연구 및 개발은 제품의 상용화보다는 단편적인 요구에 초점이 맞춰져 있는 상황이므로 더욱 발전이 더딘 실정이다.

나노위치결정 메커니즘과 관련한 연구에서는 선형 모터 또는 초정밀 볼스크류를 이용한 방식,³ 압전구동기(piezo-stack actuator)⁴ 및 플렉서 힌지(flexure hinge) 기구부를 이용한 방식,⁵ 인치웜(inchworm) 구동 방식⁶ 등 다양한 방식이 소개되

어 있다. 각 위치결정 방식에 따른 나노포지셔너는 그 방식에 따라 이송 범위, 정밀도, 정속성, 마찰에 따른 성능 저하, 발열 등 여러 측면에서 장단점을 가지고 있다. 특히 압전구동기와 플렉서 힌지를 이용한 방식은 미끄러짐에 의한 상대운동이 없는 단일요소로 이뤄진 구조(monolithic structure)를 이용하기 때문에 마찰이 존재하지 않아 이에 의한 발열 및 마모 그리고 저속에서의 비정속성을 피할 수 있으며, sub-nm 수준의 위치결정이 가능한 장점을 가지고 있다.

압전구동기와 플렉서 힌지를 이용한 나노포지셔너는 직선 및 회전 운동의 조합을 통해 다양한 운동이 설계/재현될 수 있기 때문에 다양한 형태로 개발되고 있다.^{1,2,7-9} 기구학적 특성을 고려하여 크게 직렬형과 병렬형 구조의 나노포지셔너로 구분될 수 있다. 이 중 병렬형은 좁은 이송범위를 가지지만, 높은 강성을 가지는 장점을 가져 다양한 연구가 수행되고 있다.⁷

본 연구의 목적은 단순한 구조를 가지면서 상대적으로 높은 강성을 가져 다양한 분야에 활용이 가능하며, 다양한 형태로 확장이 가능하도록 모듈화된 나노포지셔너를 설계 제작하고 단순한 구조 및 변위확대 메커니즘으로 인해 발생할 수 있는 기생운동(parasitic motion)을 분석하는 것이다. 이를 위해 직사각형의 4 절링크 구조를 이용하고 순수 굽힘을 통한 회전운동을 얻기 위해 원형 플렉서 힌지(right-circular hinge) 구조를 이용한 단축의 나노포지셔너를 설계하였다. 특히 4 절링크에서 크랭크 링크에 압전구동기를 직접적으로 부착하여 지렛대 효과를 얻는 동시에 플렉서 힌지의 직렬연결 수를 줄여 강성을 높일 수 있도록 하였다. 나아가 조립을 통해 다양한 형태로 확장이 가능하도록 하는 유연성을 확보하도록 하였다. 나노포지셔너 구조물은 기구학적 접근과 유한요소 해석을 통해 설계되었으며, 제작된 나노포지셔너 모듈 및 이를 이용한 2 축 나노포지셔너에 대해 작동 성능을 확인하였다. 특히, 단순한 구조 및 변위확대 메커니즘으로 인해 발생하는 기생 운동은 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하였다.

2. 나노포지셔너의 설계

2.1 기구학적 설계

단축의 직선 이송형 나노포지셔너는 기능적 특성을 고려하여 단축으로의 직선 이송 시 이송방향

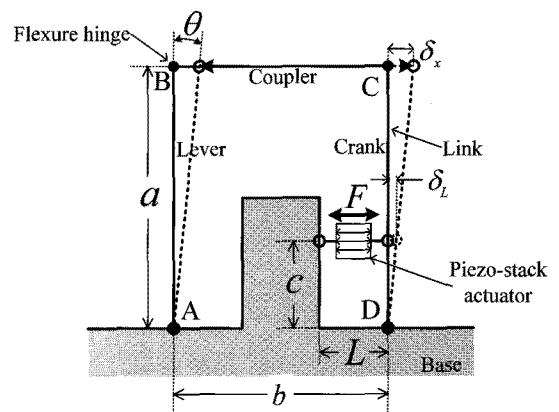


Fig. 1 Scheme of the inner actuation method for a four-bar linkage mechanism

이외의 방향으로 직선 및 회전 변위가 발생하지 않으면서 이송이 이뤄지는 것이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 평행사변형 구조의 4절 링크 구조(parallelogram four-bar linkage)⁷를 채용하였으며, 압전구동기의 설치 및 조립의 유연성을 고려하여 직사각형의 형태로 결정하였다. 특히 평행사변형 구조에서 기저링크(base link)와 평행한 연결링크(coupler link)가 항상 평행하게 움직이는 특성을 고려하여 연결링크를 최종단(end effector)으로 설정하여 최종단에서 불필요한 회전 변위가 발생하지 않도록 하였다.

평행사변형 구조에 있어서 압전구동기의 위치는 지렛대의 원리를 고려하여 충분한 변위증폭비를 얻을 수 있도록 결정되었다. 변위증폭비는 압전구동기의 인장량에 대한 나노포지셔너 최종단의 변위로 정의하였으며, 특히 본 연구에서는 압전구동기를 링크 구조의 내부에 위치시킴으로써 나노포지셔너의 형상이 간결해지도록 하였다. Fig. 1 은 평행사변형의 링크기구에 대한 기구학적 모델을 보여준다.

Fig. 1 에서 보여진 평행사변형 구조의 나노포지셔너에서 기구학적 변위증폭비를 얻기 위해, 네 개의 링크를 강체로 가정하였으며, 힌지에서는 회전만 발생하는 것으로 고려하였다. 본 연구에서 사용된 원형 플렉서 힌지¹⁰는 처짐 거동 외에 축방향의 인장 또는 압축 등의 추가변형을 가지게 되나 그 크기가 상대적으로 미소한 수준으로 기구학적 해석에서는 무시하였다.⁷

4 절 링크 구조 내에서의 압전구동기의 축 방향 변형량(δ_L)과 나노포지셔너의 실제 이송거리(δ_x)

의 비로 표현되는 변위증폭비(M_x)는 (1)과 같이 정의할 수 있다. 식에서 보인 바와 같이 Fig. 1 에서는 압전구동기의 위치와 수직방향 링크들의 길이를 조절함으로써 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 기구학적 변위증폭비를 4.0 으로 결정하였다.

$$M_x = \frac{\delta_x}{\delta_L} = \frac{a \cdot \tan \theta}{c \cdot \tan \theta} = \frac{a}{c} \quad (1)$$

2.2 강성 및 동특성 해석

2.1절에서 기구학적으로 정의된 나노포지셔너 구조물에서 플렉서 힌지의 치수 및 강체로 가정된 링크의 폭에 따라 불필요한 변형을 일으킬 수 있으므로 이를 응력해석을 통해 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 플렉서 힌지의 형상은 원형 플렉서 힌지로 결정하였으며, 핵심치수인 폭과 원형 홈의 직경¹⁰에 대해 각각 0.8 mm와 1.0 mm로 결정하였다. 마찬가지로 변형이 최소화 되어야 하는 링크의 두께는 개발하고자 한 나노포지셔너의 형상 및 크기를 고려하여 10.0 mm의 폭을 가지도록 함으로써 빔 단면계수(section modulus of a beam)가 150배 이상 큰 구조물이 되어 힌지부에 비해 상대적으로 변형이 매우 적도록 하였다. 결정된 나노포지셔너의 형상에 대해 유한요소해석을 수행하여 구조물 전체의 강성 및 동특성, 최대변위량을 예측하였다. 유한요소해석을 위해 CosmosWorks 소프트웨어를 사용하였으며, 이를 이용하여 선형해석을 수행하였다.

본 연구에서 수행한 나노포지셔너의 강성해석은 나노포지셔너 구조물에 압전구동기에 의한 힘이 주어질 때 구조물의 변형 정도를 확인하여 구조물의 강성을 예측하는 것이다. 이를 통해 압전구동기의 사양을 결정할 수 있으며 이후 구조물과 압전구동기의 특성을 반영하여 압전구동기를 포함한 나노포지셔너의 최대변위량을 예측하는데 사용하였다. 또한 기생오차의 원인인 힌지부의 부차적인 변형특성을 분석하는데 활용되었다. Fig. 2는 변형형상을 보이기 위해 본 연구에서 수행된 유한요소해석을 통해 50 N의 힘이 나노포지셔너 구조물에 주어졌을 때의 응력분포와 변형형상을 보여준다. 여기서 보인 바와 같이 응력은 힌지부에서 집중되어 나타나며, 링크부의 응력 발생은 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

해석을 통해 다양한 힘에 대해 최대응력을 조사하였으며, 이로부터 재료의 항복(yielding)을 고려

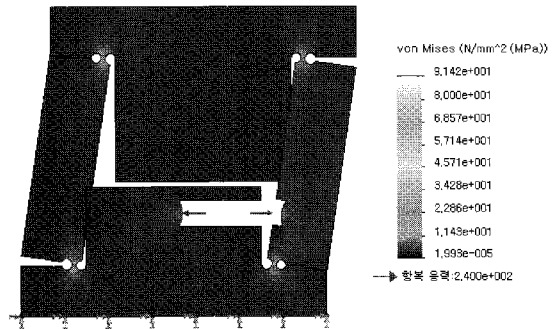


Fig. 2 Prediction of stress distribution of a nanopositioner structure when the driving force of 50 N is applied

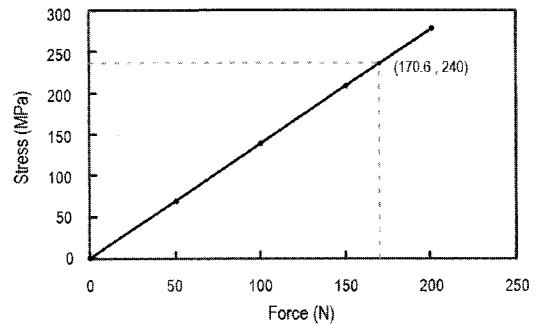


Fig. 3 Relationship between the applied force from a piezo-stack actuator and the maximum stress

하여 설계된 나노포지셔너 구조물의 작동 가능한 최대이송범위를 확인할 수 있다. Fig. 3은 다양한 구동력에 대한 최대응력을 보여주며, 본 연구에서 선택된 재질이 항복강도 240 MPa을 가지는 스테인레스스틸임 고려할 때 그림으로부터 170.6 N이 주어졌을 때 항복이 발생하며, 이때 나노포지셔너의 이송량은 약 175.5 μm 이었다. 특히 최대응력은 플렉서 힌지의 측면에서 발생하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 나노포지셔너 구조물의 피로파손 등을 고려하지 않을 때의 이상적인 최대변위량은 약 175.5 μm 임을 추정할 수 있었다.

강도해석 시 부가된 힘에 따른 응력과 함께 변형을 조사하여 설계된 나노포지셔너의 강성을 예측하였다. 특히 얻어진 강성 정보는 설계한 나노포지셔너 이송범위의 결정에 있어서 적절한 압전구동기를 선택하는데 이용될 수 있다. 본 연구에서는 단극성의 100 V를 최대전압으로 할 경우 50 μm 수준의 구동범위를 확보하고자 하여 이에 적절한 압전구동기를 선정하였으며, Fig. 4는 나노포

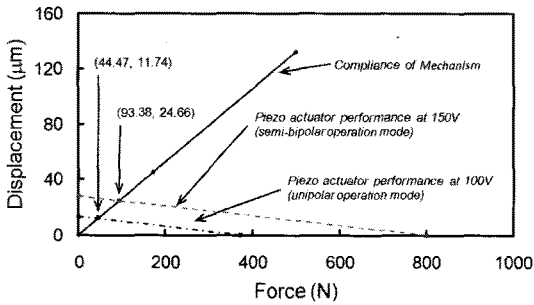


Fig. 4 Estimation of the maximum displacement of a nanopositioner from the compliance of the nanopositioner structure and the performance of a piezo-stack actuator

지셔너 구조물의 강성특성과 선정된 압전구동기의 작동 조건에 따른 힘-변형량 특성을 보여준다. 특히 본 연구에서 사용한 압전구동기(PSt 150/3.5 x 3.5/20, Piezomechanik)는 25 N/µm의 강성을 가지며, 반이극성 작동 모드(semi-bipolar operation mode)에서는 150 V의 전압이 인가되었을 때 28 µm의 최대 변위와 800 N의 최대구동력을 발생시킬 수 있다. 또한 단극성 작동모드(unipolar operation mode)에서는 150 V의 전압이 인가되었을 때 20 µm의 최대 변위와 약 560 N의 최대구동력을 발생시킬 수 있다. 이로부터 주어진 압전구동기를 포함한 나노포지셔너의 최대변위량과 이때 압전구동기에서 발생하는 힘을 얻을 수 있다. Fig. 4에서는 선정된 압전구동기를 이용한 최대변위 추정을 위해 반이극성 작동 모드에서의 최대전압(150 V)이 가해졌을 때의 성능직선과 본 연구에 사용한 단극성의 최대전압 100V에서의 변위를 추정하기 위한 성능직선이 제시되었다. 그림에서 보여진 바와 같이 본 연구에서 개발한 나노포지셔너와 결합된 압전구동기는 나노포지셔너 구조물의 강성을 고려하였을 때 최대전압 인가시 반이극성 작동 모드에서 24.7 µm까지 늘어나며, 동시에 93.4 N의 구동력을 발생시킴을 알 수 있다. 또한 이때의 구조물에서의 응력은 Fig. 3으로부터 131.7 MPa임을 알 수 있고, 2.1 절의 기구학적 변위증폭비를 고려하였을 때 구조물의 이송변위는 약 98.6 µm 이어야 하며, 해석결과 96.1 µm으로 약 2.6%의 차이를 보여 기구학적 특성이 잘 반영된 것으로 평가된다. 특히 압전구동기에 의해 발생하는 최대 힘에 의한 최대응력은 항복강도의 약 55% 수준으로 적절한 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다. 여기서 유한요소해석에 의한

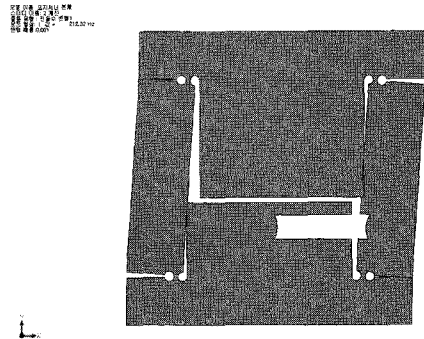


Fig. 5 Mode shape of a nanopositioner structure at the first mode frequency (212.32 Hz)

변위증폭비는 약 3.9로서 기구학적으로 설계된 4와 유사하지만 2.8% 정도의 차이를 가지는 것은 설계한 플렉서 힌지의 부가적 변형에 의한 것으로 추정되고, 부가적 변형에 의한 나노포지셔너의 작동 오차는 실험 및 시뮬레이션을 통해 확인하여 3절에서 제시하였다. 또한 실험에 이용된 최대 100 V의 단극성 작동 모드에서는 압전구동기에서 11.74 µm의 변위가 발생하여 나노포지셔너는 약 47 µm의 최대 변위를 가짐을 추정할 수 있다.

유한요소해석을 통해 응력해석과 함께 공진주파수를 확인하기 위해 주파수 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 1차 고유진동수는 약 212.3 Hz이었으며, 1차 공진모드는 설계된 작동방향과 동일함을 확인하여 1차 고유진동수에 의한 동특성이 작동에 직접적으로 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. Fig. 5는 1차 고유진동수에서의 모드 형상을 보여 준다.

2.3 조립성을 고려한 최종 형상 설계

2.2 절에서 해석한 결과를 바탕으로 단축뿐만 아니라 2축 및 3축 등 다양한 형태로 조립할 수 있도록 최종형상을 설계하였다. 이러한 조립확장성은 다양한 형태의 연결부를 적용함으로써 이뤄졌다. 최종 설계된 나노포지셔너에 대하여 조립구멍 등 추가된 형상에 따른 특성 변화를 확인하기 위해 응력 및 변형량 해석, 공진주파수 해석 등을 수행하였다. 확인 결과 각 해석 결과는 앞에서 수행된 해석 결과와 큰 차이가 없음을 확인하였다.

3. 나노포지셔너의 제작 및 제어

최종 설계된 나노포지셔너를 실제 제작하여 검

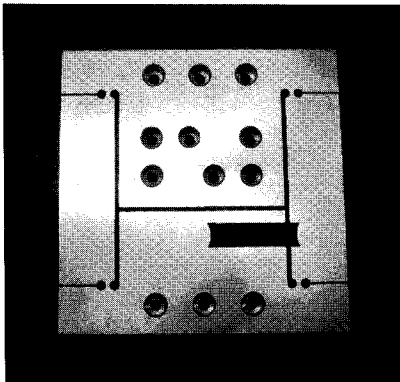


Fig. 6 Actual nanopositioning module based on flexure hinge mechanism

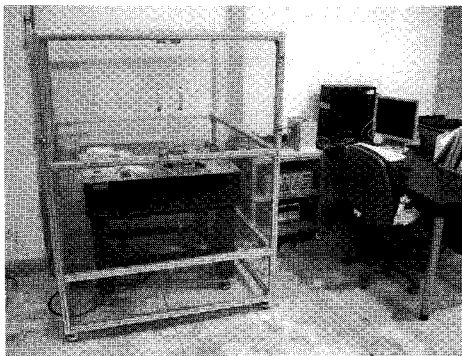
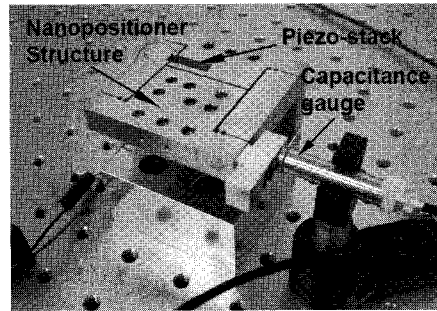


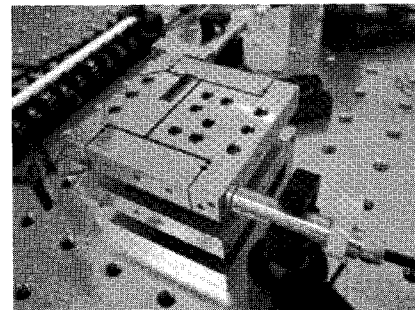
Fig. 7 Experimental setup of a nanopositioner

증하였다. 제작된 나노포지셔너의 재질은 스테인레스스틸인 SUS303 으로 선정하였으며 플렉서 힌지와 같이 미세하고 정밀한 부분의 가공을 위해 와이어 방전가공(wire-cut EDM)을 이용하여 제작되었다. 변위 측정 및 피드백 시스템 구성을 위해 용량형 변위 센서를 이용하였으며, 센서 타겟은 변위 측정 시 측정 면의 거칠기 및 평탄도에 의한 오차를 최소화 하기 위해 연마처리를 하였다. Fig. 6 은 제작된 나노포지셔너 모듈을 보여준다.

나노포지셔너는 온도, 습도, 공기 유동, 진동 등 다양한 환경요인에 영향을 받는다.¹¹ 따라서 이러한 환경요인의 변화를 최소화 하는 것이 필요하다. 우선 온도 및 습도는 항온항습 환경을 통해 갑작스런 온도변화가 발생하지 않도록 하였으며, 공기유동은 자체적인 제어보다는 차단막을 통해 내부 유동을 제거함으로써 그 영향을 최소화하였다. 외부로부터의 진동은 방진테이블을 이용하여 차단되도록 하였다. Fig. 7 은 이러한 외부환경 요인의 영향 최소화를 위한 차단막 내부에 설치된



(a)



(b)

Fig. 8 Developed nanopositioning systems; (a) single-axis nanopositioner, (b) X-Y nanopositioner

실험환경을 보여준다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 성능 검증 실험을 위해 설치된 단축 및 직교 2 축의 나노포지셔너 시스템을 보여준다.

나노포지셔너의 동작을 위해 나노포지셔너 구조물, 압전구동기, 용량형 변위 센서, 전압증폭기, 제어기 등으로 구성된 실험장치를 구성하였다. 시스템의 페루프 제어를 위해 Delta-Tau 의 UMAC 제어기를 사용하였으며, 적용된 용량형 변위 센서 (2805 & 4810, MicroSense)는 전기적 잡음을 고려했을 때 1 nm 정도의 분해능을 가지며, $\pm 100 \mu\text{m}$ 측정범위, 100 Hz의 대역폭, 0.02 % 이내의 선형성 오차를 가지고 있다.

제작된 나노포지셔너 실험장치의 최대변위를 측정하기 위해 0 V 부터 100 V 까지의 구동전압을 공급하여 나노포지셔너의 개루프 변위를 측정하였다. Fig. 9 는 전압에 따른 나노포지셔너의 변위를 보여주며, 이로부터 구동전압에 대해 이송변위가 선형성을 확보하고 있음을 알 수 있으며, 최대 100 V 의 단극성 구동환경 하의 실험장치에서는 약 $51 \mu\text{m}$ 의 최대변위를 가짐을 확인하였다. 이는 Fig. 4 에서 보인 단극성의 100 V 구동전압에 대한 예측결과와 약 8%의 오차를 가짐을 알 수 있다.

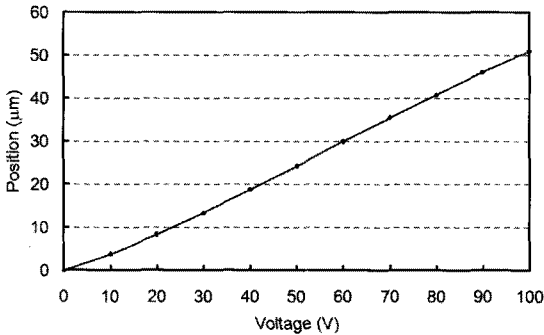


Fig. 9 Relationship between the displacement and the applied voltage at open loop mode

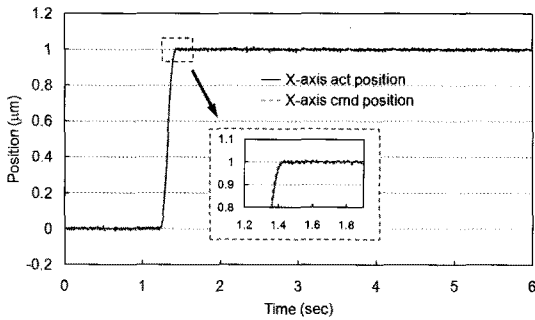
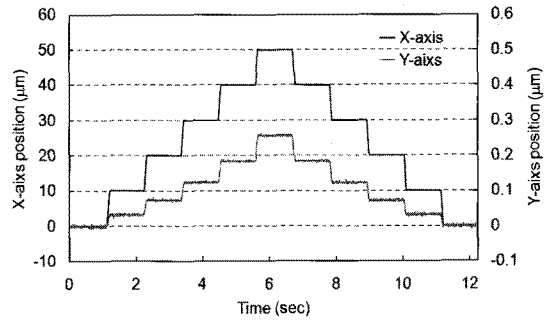


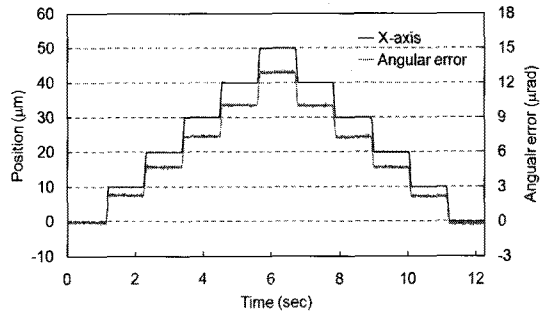
Fig. 10 Step response with the magnitude of 10 μm

폐루프 제어를 위한 알고리즘은 제어기에서 제공하는 필터를 포함한 비례-적분-미분 제어기를 이용하였으며, 필터는 50 Hz 를 절단주파수를 가지는 저주파 통과필터로 설정되었다.^{13,14} Fig. 10 은 구성된 단축의 나노포지셔너의 10 μm 의 크기를 가지는 계단응답을 보여준다. 응답결과로부터 8 msec 의 상승시간(rise time)과 12 msec 의 안정화시간(settling time)을 가짐을 확인하였다. 그림에서 보여진 바와 같이 본 연구에서 개발된 나노포지셔너의 압전구동기의 빠른 응답특성과 안정한 위치결정 특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

Fig. 11 은 50 μm 까지 10 μm 씩의 연속 계단응답과 이때의 수직방향 및 면의 수직축에 대한 회전방향 기생운동을 보여준다. 이송응답은 안정화 후 일정한 위치(50 μm)를 유지하는 동안의 RMS 오차가 약 1.96 nm 임을 볼 수 있었다. 이송방향에 대한 수직방향 응답은 이송방향 응답에 비례하면서 약 0.5 % 수준의 변위를 가짐을 확인할 수 있었으며, 면의 수직축에 대한 회전방향 기생운동은 50 μm 이송 시 최대 약 13 μrad 의 각도오차를 가지며, 이송량에 비례하여 각도오차가 발생함을 확



(a)



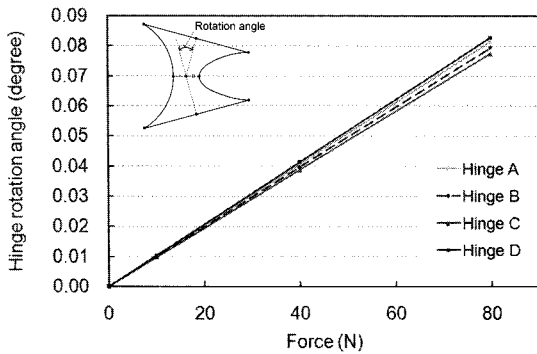
(b)

Fig. 11 Parasitic motions with respect to the stepwise motion with the magnitude of 10 μm ; (a) Transversal motion (Y) according to the feed motion (X); (b) Angular motion according to the feed motion (X)

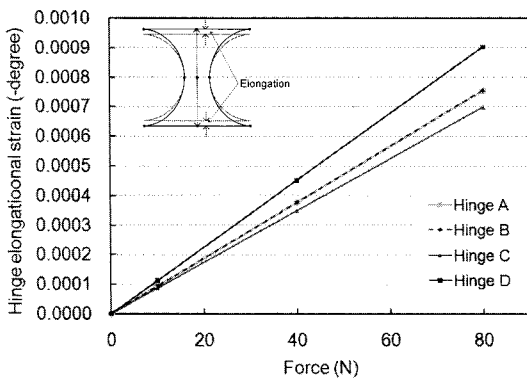
인할 수 있다. 이러한 점으로 미루어 플렉서 힌지가 순수회전과 함께 그 외의 미세한 기생변형을 가짐을 알 수 있다.

힌지부의 기생변형을 확인하기 위해 강성해석을 위한 시뮬레이션을 이용하였다. 이는 Fig. 11(b)에서 10 μm 이송 시의 각도오차인 약 2.3 μrad 에 대해 해석결과에서는 약 2.1 μrad 의 각도오차를 보여 시뮬레이션 모델이 실제의 거동을 잘 반영되는 것을 확인할 수 있었기 때문이다. 따라서 시뮬레이션 모델을 이용하여 힌지부의 변형거동을 분석하였다. Fig. 12(a)와 (b)는 각각 주어진 힘에 대해 네 개의 힌지부의 회전각도와 길이방향 변형을 비교한 결과를 보여준다. Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 평행사변형 구조임에도 불구하고 힌지의 회전이 미세한 차이를 두고 다름을 확인할 수 있으며, Fig. 12(b)에서 보인 바와 같이 각 힌지의 인장량에서도 차이를 보임을 볼 수 있다.

외부의 부하하중에 따른 이송 성능을 평가하기



(a)



(b)

Fig. 12 Relationships between hinge deformation and the applied force; (a) Hinge rotations according to the applied force; (b) Hinge elongations according to the applied force

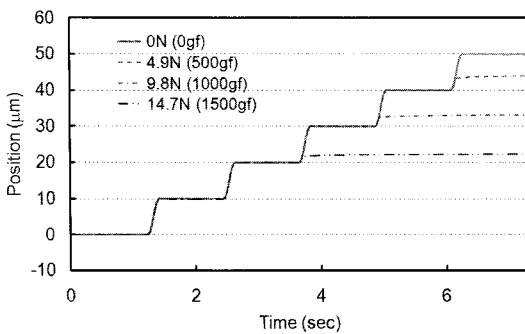


Fig. 13 Influence of the external load on the maximum displacement

위해 이송방향에 대해 하중을 부가하고 제어이송을 수행하였다. 이러한 경우 압전소자에 의해 이송되는 플렉서 힌지 기반의 나노포지셔너는 원점

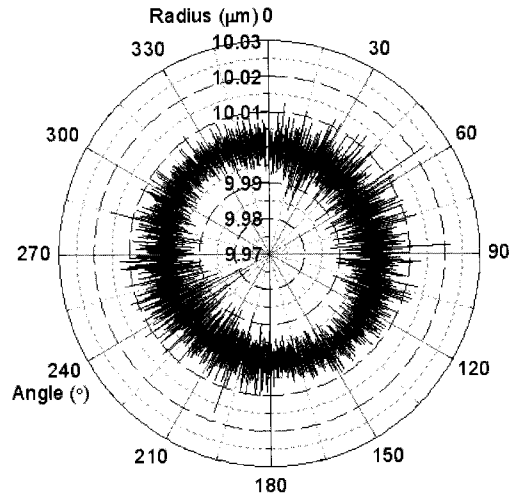


Fig. 14 Position error for circular motion of the developed XY nanopositioner

오프셋(zero-point offset) 효과에 의해 하중이 없을 때의 원점을 기준으로 인장 방향에서의 최대변위 감소로 나타나는 것으로 알려져 있다.¹² 본 연구를 통해 개발된 나노포지셔너는 약 2.2 $\mu\text{m}/\text{N}$ 의 단위의부하중에 대한 원점 오프셋을 가짐을 확인하였다. 또한 이러한 원점 오프셋에 의한 영향으로 외부하중이 부가되기 전의 원점을 기준으로 할 때 주어진 외부하중에 비례하여 최대 변위가 주어진 외부하중에 대한 원점오프셋만큼 저하됨을 확인할 수 있었다. Fig. 13은 각각 500, 1000, 1500 gf의 외부하중이 주어짐에 따라 이송변위가 제한됨을 보여준다.

직교 2 축 나노포지셔너의 성능검증 실험을 수행하였다. 단축 이송을 통해 위치결정 정밀도를 확인하였으므로, 2 축 성능검증에서는 원호이송 정밀도를 확인하고자 하였다. 이러한 검증실험은 기존의 볼스크류 기반 이송장치에서는 동적 불일치(mismatch), 마찰력 등으로 인한 오차가 비중 있게 다뤄져 왔다. 본 연구에서는 반경 10 μm 의 원형 경로에 대한 위치결정 실험을 수행하였으며, 이송 속도는 183 nm/min로 하였다. Fig. 14는 이송결과를 극좌표계에서 보여주며, 오차 분석을 위해 반경방향 스케일을 확대한 것이다. 그림으로부터 RMS 오차는 4.54 nm임을 확인할 수 있었으며, 단축이송에 비해 오차가 증가한 이유는 하중 증가 및 스프링 계수의 변화로 인한 동특성 변화에 따른 진동 특성에 의한 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 조립을 통하여 2 축 및 3 축 등 다양한 형태로 확장이 가능한 단축의 모듈형 나노포지셔너를 개발하였다. 개발된 나노포지셔너 모듈은 원형의 플렉서 힌지 기반의 평행사변형 구조를 가지고 있으며, 압전구동기에 의해 구동된다. 나노포지셔너의 개발은 기구학적 해석과 유한요소법에 의한 응력 및 진동특성 해석을 통해 설계되었다. 개발된 나노포지셔너는 약 212 Hz 의 공진주파수와 약 3.9 의 변위증폭비를 가지도록 하였으며, 구조적으로 약 90 μm 이상의 이송 범위를 가질 수 있도록 하였다. 와이어 방전가공을 통해 제작된 나노포지셔너 모듈과 용량형 변위센서, 전압증폭기, 제어기를 이용하여 단축 및 직교 2 축 나노포지셔너를 구성하였으며, 각각의 경우에 대해 실험을 통해 작동성능을 제시하였다. 개발된 나노포지셔너는 빠른 응답성을 가지고 있으며, 높은 위치결정정밀도를 확보하고 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 기초연구지원사업 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0015809).

참고문헌

- Sugihara, K., Mori, I., Tojo, T., Ito, C., Tabata, M. and Shinozaki, T., "Piezo electrically driven XY θ table for submicron lithography system," Review of Scientific Instruments, Vol. 60, No. 9, pp. 3024-3029, 1989.
- Chen, H. T. H., Ng, W. and England, R. L., "Finite element analysis of a scanning X-ray microscope micropositioning stage," Review of Scientific Instruments, Vol. 63, No. 1, pp. 591-594, 1992.
- Chen, J. S. and Dwang, I. C., "A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 4 pp. 513-526, 2000.
- Mizutani, K., Kawano, T. and Tanaka, Y., "A piezoelectric-drive table and its application to micro-grinding of ceramic materials," Precision Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 219-226, 1990.
- Park, J. and Jeong, K., "A Study on the Design and Control of a Ultra-precision Stage," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 111-119, 2006.
- Ye, S. D., Jeong, J. H. and Min, B. H., "A Study on Design and Manufacture of an Inchworm Linear Motor System," J. of KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 174-181, 2004.
- Yao, Q., Dong, J. and Ferreira, P. M., "Design, Analysis, Fabrication and Testing of a Parallel Kinematic Micropositioning XY Stage," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 946-961, 2007.
- Kang, J.-O., Seo, M.-H., Han, C.-S. and Hong, S.-W., "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Part 1. Analysis and Design," J. of KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 147-154, 2004.
- Kang, J.-O., Baek, S., Han, C.-S. and Hong, S.-W., "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Part 2. Fabrication and Performance Evaluation," J. of KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 155-162, 2004.
- Paros, J. M. and Weisbord, L., "How to design flexure hinges," Machine Design, Vol. 37, No. 25, pp. 151-156, 1965.
- Jeong, Y. H., Dong, J. and Ferreira, P. M., "Self-calibration of dual-actuated single-axis nanopositioners," Measurement Science and Technology, Vol. 19, No. 4, Paper No. 045203, 2008.
- Physik Instruments GmbH & Co. KG, "Cat120E Inspirations 2009 (Nanopositioning / Piezoelectrics)," p. 191, 2008.
- Pahk, H. J., lee, D. S. and Park, J. H., "Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 1, pp. 51-63, 2001.
- Furutani, K., Urushibata, M. and Mohri, N., "Displacement control of piezoelectric element by feedback of induced charge," Nanotechnology, Vol. 9, No. 2, pp. 93-98, 1998.