

진동 및 제어 부문 특별세션

4절링크 기구기반의 회전형 초정밀위치결정기구의 개발

정영훈^{a*}

Development of Rotational Nanoactuator Based on Four-Bar Linkage

Young Hun Jeong^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ., Sangyeok 3-dong, Buk-gu, Daegu, 702-701, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	21	July	2014
Revised	27	July	2014
Accepted	30	July	2014

Keywords:

Flexure
Nanopositioning
Rotational nanoactuator
Four-bar linkage
Piezo-electric stack actuator

ABSTRACT

Ultra-precision positioning plays a crucial role in emerging technologies such as electronics, bioengineering, optics, and various nanofabrication technologies. As a result, various nanopositioning methods have been presented. In particular, nanopositioning using a flexure mechanism and piezo-electric actuator is one of the most valuable methods because of its friction-free motion and subnanometer-scale motion resolution. In this study, a rotational nanoactuator based on a right-circular flexure mechanism and piezo-electric actuator was developed through a consideration of the kinematics and structural deformation. An experimental setup was constructed to verify the performance expectation. Consequently, it was demonstrated that the developed system had a maximum rotational angle of about 0.01 rad, as well as sufficient linearity with respect to the input voltage.

1. 서론

최근, 반도체, 디스플레이, 생명과학, 나노공학 등 첨단과학기술 분야의 괄목할만한 발전이 이뤄지고 있다. 이러한 발전이 요구하는 기술분야로서 초정밀위치결정이 있다. 관련분야의 제품이 높은 성능과 품질을 확보하기 위해서는 높은 위치정밀도가 요구되며, 이를 위해 nm 또는 그 이하 수준의 분해능 및 정밀도를 가지는 위치결정기술이 핵심적인 기술로 평가되고 있다. 이로 인해, 초정밀위치결정기구는 반도체 공정 및 박판 디스플레이를 위한 공정장비^[1], 정밀광학장치^[2] 등 정밀 산업계 전반에서 핵심적인 기술로 각광받고 있다. 따라서, 관련 학계 및 산업계에서도 초정밀위치결정 기술에 대한 다양한 연구와 개발이 이뤄지고 있다. 특히, 관련 선진국에서는 이와 관련한 다양한 초정밀위치결정장치의 상용화가 이뤄져 있다. 그러나 관련 시장은 지적재산권 장벽 및 기술 획득의 어려움

으로 시장진입이 제한되어 있는 상황이다.

초정밀위치결정은 다양한 방식을 통해 접근이 가능하다. 우선, 전통적인 방식인 선형 모터 또는 초정밀 볼스크류를 이용한 방식이 있으며^[3], 이 방식은 마찰력의 저감과 관련한 문제가 일부 존재하고 있다. 또 다른 방법으로 압전구동기(piezoelectric actuator)^[4]를 이용하는 방법이 있으며, 압전구동기의 고속 구동을 이용한 방법^[5] 및 플렉서 힌지(flexure hinge) 기구부를 이용한 방식^[6] 등이 소개되어 있다.

특히, 압전소자를 이용한 방식은 높은 위치결정 분해능으로 1 nm 이하 수준의 이송이 가능한 장점이 있다. 또한 플렉서 기구를 이용할 경우 높은 정밀도 및 분해능과 함께 이송의 정숙성이 높고, 마찰, 마모 및 발열거동이 없는 장점을 얻을 수 있다. 따라서, 저속 및 초미세 이송 시 마찰에 의한 이송품질 저하를 해결할 수 있다. 그러나 좁은 이송 범위를 가지는 단점 또한 존재한다. 압전구동기

* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5577

Fax: +82-53-950-6550

E-mail address: yhjeong@knu.ac.kr (Young Hun Jeong).

와 플렉서 기반의 초정밀 위치결정기구는 플렉서 구조물의 다양한 기구학적 변형을 고려한 설계를 통해 복잡한 운동을 생성할 수 있는 장점으로 인해 다양한 형태의 초정밀위치결정기구가 개발된 바 있다^{1,2,7)}.

본 연구에서는 압전동기와 플렉서 구조물을 가지며, 초미세 초정밀회전을 생성하는 위치결정기구를 개발하고자 하였으며, 다양한 분야에 활용이 가능하도록 기존의 회전형 위치결정기구에 비해 높은 강성을 가질 수 있도록 하였다. 우선 기구학적으로 원하는 회전거동 및 증폭비를 얻을 수 있도록 4절링크 구조를 이용하였으며, 플렉서 부분에서의 보다 이상적인 회전조인트 운동을 얻기 위해 원형 플렉서(right-circular flexure)를 적용하였다. 플렉서 구조물은 기구학적 설계와 함께 유한요소기반의 선형해석을 통해 설계되고 제작되었다. 제작된 초정밀위치결정기구에 대해 간단한 실험을 통해 그 기능을 검증하였다.

2. 형상설계

일반적으로 압전소자(piezo-electric stack actuator)는 주어진 전기장에 대해 미세한 수준의 신장(elongation)을 발생시키므로 충분한 운동을 얻기 위해서는 압전소자의 신장을 증폭시켜 원하는 운동을 얻어내는 것이 필수적이다. 특히, 본 연구에서 의도한 회전을 위해서는 이러한 증폭기구에 대한 충분한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 전통적인 4절링크기구의 하나인 크랭크-레버기구를 증폭기구로 선정하였다. 이는 크랭크(crank)와 레버(lever)의 치수를 이용하여 손쉽게 증폭이 가능하기 때문이다. 또한, 4절링크에서 크랭크 링크 측면에 압전소자의 신장효과가 직접적으로 가해질 수 있도록 직접 부착이 이뤄지도록 하였으며, 그 부착위치는 지렛대 효과를 고려하였다. 또한 직렬로 연결되는 플렉서의 수는 최소화하여 강성 저하가 없도록 하였다. Fig. 1은 선정한 플렉서 구조물의

기구학적 고려를 위한 크랭크-레버 4절링크기구를 보여준다. 그림에서 압전소자는 점 (x_g, y_g) 와 (x_a, y_a) 의 사이에 부착된다. 또한, 기저부(base)는 고정되며, 레버는 일반적으로는 종동부로 사용되지만, 본 연구에서는 구동부로 사용하여 크랭크 링크에서 레버의 회전각이 증폭될 수 있도록 하였다. 이때 회전각도의 증폭비(M_θ)는 레버와 크랭크 링크의 기저부와와의 연결점에서 커플러(coupler) 링크에의 수선의 발의 길이비로 정의되며, 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 식에서의 각 기호는 Fig. 1에 제시된 바와 같다.

$$M_\theta = \frac{\Delta\theta_4}{\Delta\theta_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{\alpha}{\beta} \tag{1}$$

압전소자와 플렉서로 구성된 초정밀위치결정기구에서는 압전소자의 신장량에 대한 종동부의 운동을 고려하는 것이 필요하다. 따라서, 압전소자의 길이 및 그 변화에 따른 크랭크 링크의 회전각의 비를 분석하였다. 우선 식 (2)는 이상적인 위치에 압전소자가 설치되었을 때의 레버의 회전각과 압전소자의 길이의 관계를 보여준다. 또한 이로부터 압전소자의 신장량에 따른 크랭크축의 회전각의 관계를 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$L = \sqrt{(x_g + |\vec{l}_a| \cos(\theta_2 + \theta_a))^2 + (y_g - |\vec{l}_a| \sin(\theta_2 + \theta_a))^2} \tag{2}$$

$$\frac{d\theta_4}{dL} = M_\theta \frac{d\theta_2}{dL} = \frac{M_\theta \sqrt{(x_g + |\vec{l}_a| \cos(\theta_2 + \theta_a))^2 + (y_g - |\vec{l}_a| \sin(\theta_2 + \theta_a))^2}}{x_g |\vec{l}_a| \sin(\theta_2 + \theta_a) + y_g |\vec{l}_a| \cos(\theta_2 + \theta_a)} \tag{3}$$

이상의 관계를 고려하여 회전형 초정밀위치결정기구의 기본형상을 설계하였다. Fig. 2는 설계된 구조물의 기본 형상을 보여준다. 그림에서 보인 바와 같이 기본 구조물은 기본적인 크랭크-레버 4절링크 구조를 가지고 있으며, 레버 링크에 비해 크랭크 링크를 매우 짧게 하여 높은 증폭비를 얻을 수 있도록 하였다. 또한 커플러 링크(BC)는 회전각의 증폭비 및 힘의 전달에서는 기구학적으로 영향을 미치지 않는다. 본 연구에서 레버의 회전각도에 대한 크랭크 링크의 회전각도의 비(회전각도 증폭비)는 6.54로 높은 증폭비를 얻을 수 있도록 설계하였다. 또한 압전소자와 레버 링크와의 접촉점은 회전과 상관없이 그 위치를 유지할 수 있도록 고정용 플렉서를 추가하여, 그림에서 E지점에 항상 구동력이 부가될 수 있도록 하였다. 이상과 같은 방법으로 인해 압전소자의 신장에 따라 설계된 위치결정기구에서 크랭크 링크는 시계방향으로 회전하게 된다.

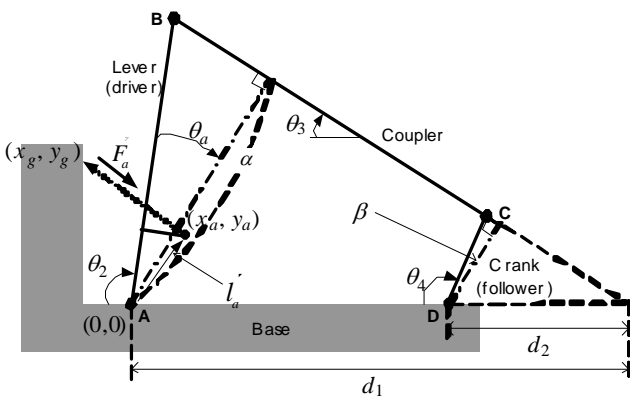


Fig. 1 Simple crank-lever four-bar mechanism for a rotational actuator

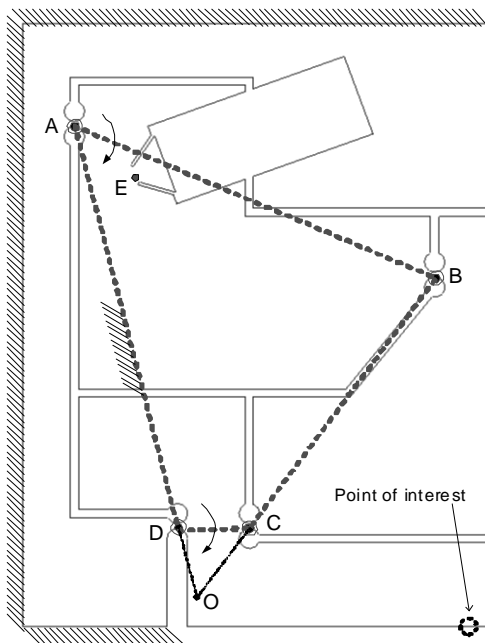


Fig. 2 Geometry of a flexure-based rotational nanoactuator

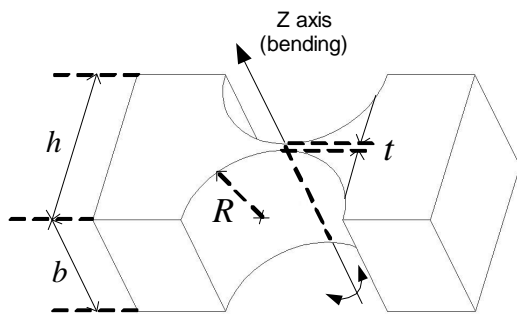


Fig. 3 Geometry of a right-circular flexure

본 연구에서 사용된 원형 플렉서의 기본적인 구조는 Fig. 3에서 보여준다. 그림에서 보인 바와 같이 반원 또는 원형의 노치 두 개가 맞붙어있는 구조인 원형 플렉서는 두 개의 반원의 중심이 동일 선상에 있게 하고 이때 가장 좁은 폭을 가지는 지점에서 대부분의 굽힘변형을 가지게 되어 회전과 유사한 거동을 가질 수 있도록 한다. 그러나 이 방식은 한 지점에서 변형이 집중되어 변형량이 판스프링 형식 등의 다른 방식에 비해 적은 단점이 있으나, 상대적으로 높은 강성을 가진다. 본 연구에서 제작된 원형 플렉서의 치수는 최소폭(t)이 0.5 mm이며, 반원 노치의 반경(R)이 1 mm, 그리고, 두께(b)는 10 mm로 하였다. 구조물의 재질이 스프링강(spring steel)이었으므로 영률(Young's modulus)과 항복강도를 고려하였을 때, 단일 플렉서가 가지는 회전축으로의 강성은 약 28 Nm/rad이었다. 또한, 항복강도를 고려할 때 최대허용토크는 0.667 Nm이며, 이때 최대 회전각은 0.0238 rad으로 약 1.36도에 해당하였다.

보다 정확한 해석을 통한 설계를 위해 유한요소를 기반으로 한

선형변형해석을 수행하였다. 해석은 상용의 해석 소프트웨어 (COMSOL Multiphysics)를 이용하였으며, 3차원 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 요소모델을 보여준다. 그림에서 보인 바와 같이 해석은 사면체요소를 기반으로 하였으며, 총 21,644개의 요소로 구성되었다. 또한 형상의 특성에 따라 상대적으로 미세한 형상을 가지는 곳에는 상대적으로 작은 요소로 구성되도록 하였다. 반면, 상대적으로 큰 폭을 가지거나 변형이 적은 곳은 큰 요소가 차지하도록 하여 해석속도를 개선할 수 있도록 하였다.

Table 1은 구조물에 사용된 재질인 스프링강의 재료특성을 보여준다. 표에서 보인 바와 같이 강재의 기본 특성인 영률, 밀도, 프와송비는 일반 강재와 거의 동일하지만, 항복강도가 매우 높은 특성을 가짐을 볼 수 있고, 이러한 특성은 동일한 강성을 가지지만, 더 큰 변형을 견딜 수 있는 장점을 가지게 하여, 플렉서 구조물에 적합함을 알 수 있다.

변형 해석에 앞서, 압전소자에 의한 플렉서 구조물의 구동은 진동에 다소 취약한 특성을 가지므로 모드 해석을 통해 공진 가능성을 확인할 필요가 있다. 이에 따라 구성된 유한요소 해석모델

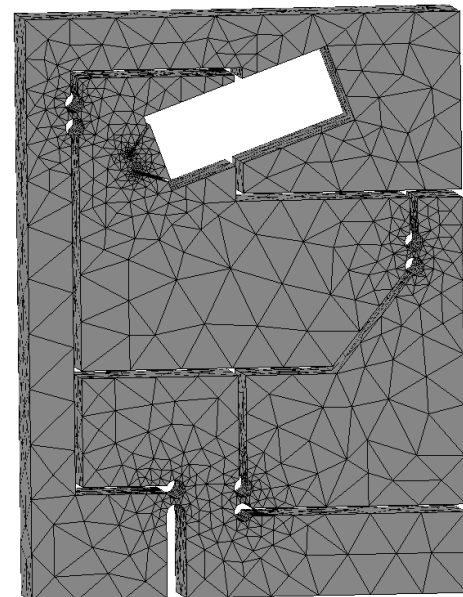
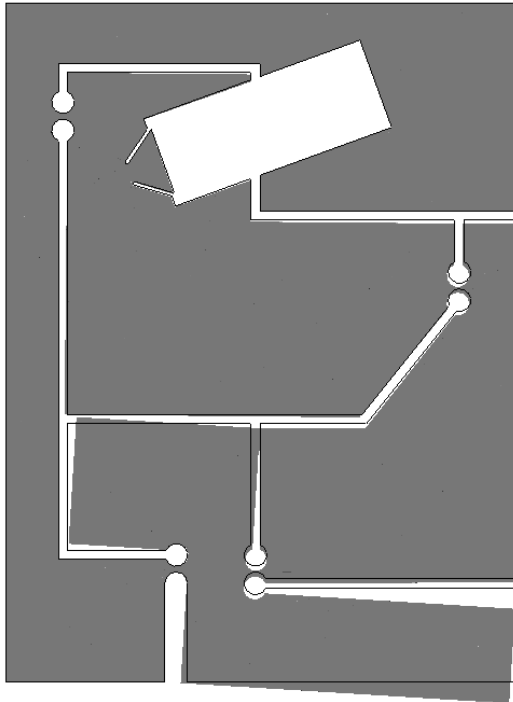


Fig. 4 FE model of designed geometry for the rotational nano-actuator

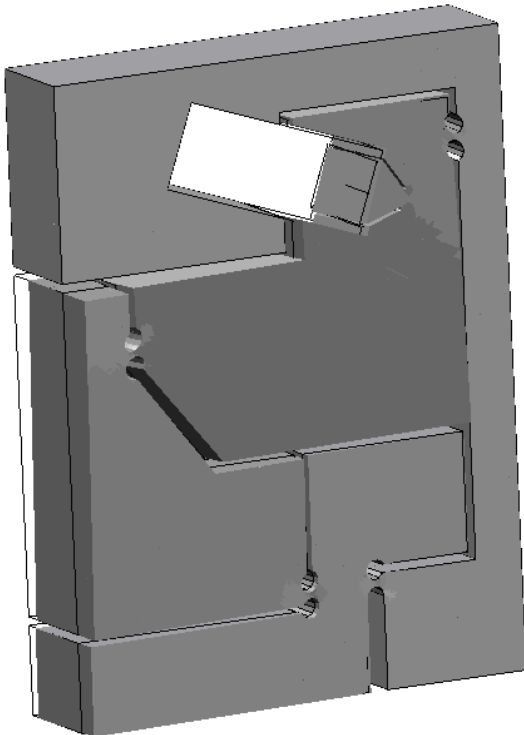
Table 1 Material properties

Properties	Values
Young's modulus (GPa)	210.0
Density (kg/m ³)	7,850.0
Poisson ratio	0.313
Yield strength (GPa)	1.6

(finite element model, FEM)을 이용하여 모드 분석을 수행하였다. 해석결과 1차 모드는 약 450 Hz에서 발생하였으며, 2차모드는 약 1540 Hz에서 그리고 3차모드는 2790 Hz에 존재함을 확인하였다. 특히 1차 모드는 작동조건과 동일한 방향으로 성능에 영향을



(a) 1st mode

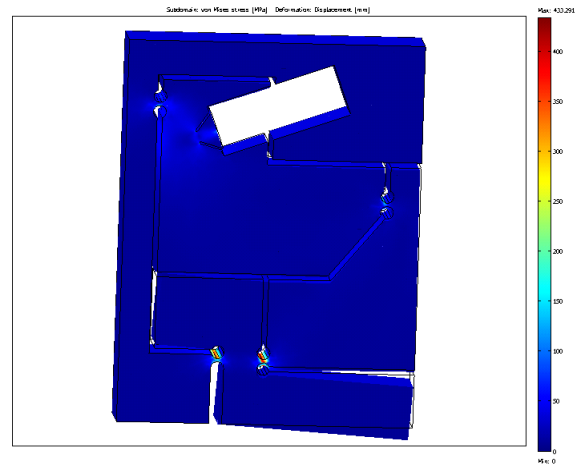


(b) 2nd mode

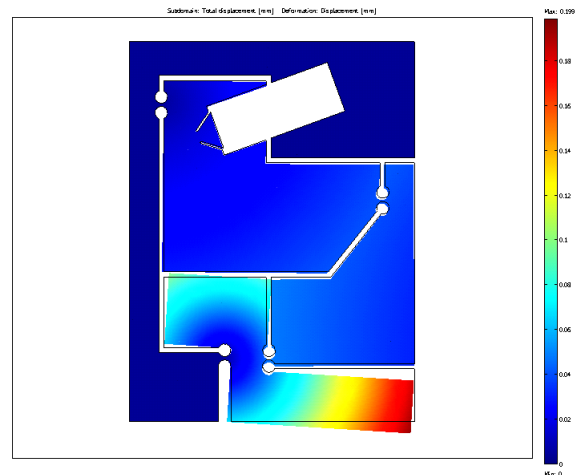
Fig. 5 Mode shapes of 1st and 2nd modes

미칠 수 있으나, 작동상황에 비해 충분히 높은 주파수를 가지며, 제어기에서 노치필터를 추가함으로써 개선이 가능하므로 적절한 설계가 이뤄졌음을 알 수 있었다. Fig. 5는 1차 모드와 2차 모드의 모드 형상(modal shape)을 보여주며, 앞에서 언급한 바와 같이 Fig. 5(a)는 실제 작동방향과 동일함을 알 수 있다.

선형변형해석을 통해 압전소자로부터 주어진 구동하중에 대한 응력 및 변형거동을 분석하였다. 우선 선정된 재질이 매우 높은 항복강도를 가져 일반적인 강에 비해서는 3배 이상의 허용신장률을 가지므로 연성의 특성이 강하다. 따라서, Tresca 응력에 대신하여 von Mises 응력을 파손조건으로 선정하였다. Fig. 6은 압전소자로부터 500 N의 힘이 압전소자 부착면에 가해졌을 때 응력분포, 변형량 및 형상을 보여준다. 우선 Fig. 6(a)에서는 von Mises 응력분포를 보여주며, 그림에서 플렉서 및 그 주변에만 응력이 집중되어



(a) Von Mises stress distribution



(b) Total displacement distribution (multiplied by 10)

Fig. 6 Simulation results of stress and deformation when driving force from a piezo-electric stack actuator of about 500 N

변형이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 그 외의 부분에서는 색의 변화가 거의 없으므로 기구학적인 설계와 유사하게 이상적인 변형이 발생하였음을 추정할 수 있다. 또한, Fig. 6(b)에서는 변형량 및 그에 따른 변형형상을 볼 수 있으며, 종동부인 크랭크 링크에서 다른 링크에 비해 큰 회전이 발생하였음을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과를 이용하여 보다 구체적인 분석을 수행하였다. 우선, Fig. 7은 압전소자로부터 가해진 구동력에 따른 최대 von Mises 응력의 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 구동력이 증가함에 따라 응력도 증가함을 볼 수 있다. 이때 선형 계수는 약 0.87정도의 수준에 있음을 알 수 있다. 파손을 고려한 최대허용구동력을 추정하였다. 구조물 재료의 항복강도가 1.6 GPa임을 고려하고 피로파손을 고려하였을 때, 압전소자로부터 가해질 수 있는 최대 구동력은 약 940 N임을 확인하였다.

본 연구에서는 이러한 최대구동력을 고려하여 최대구동력이 3500 N이며, 최대 신장량이 28 mm인 압전소자(PSt 150/10×10/20, Piezomechanik GmbH)를 구동요소로 선정하였다. Fig. 8은 구동력에 따른 압전소자의 신장량과 크랭크 링크의 회전각의 변화를 보여준다. 이때 압전소자의 신장량은 부착지점 간의 거리증

가로부터 얻어진 것으로서 구동력과 신장량의 비례계수는 구조물의 연성(compliance)을 의미한다. 그림에서 보인 바와 같이 구동력의 증가에 따라 구조물 측면에서의 압전소자 신장량은 선형적으로 증가함을 볼 수 있으며, 이는 비록 레버 링크가 회전하여 삼각함수의 파형을 가져야 하지만, 미소회전에 의해 선형구간 상에 있는 것을 이유로 한다. 또한, 크랭크 링크의 회전각도 또한 선형적인 관계에 있음을 볼 수 있다. 우선, 최대 구동력인 940 N이 가해지는 경우 압전소자의 신장량은 21.70 mm이며, 이때 크랭크 축의 회전각도는 0.0118 rad으로 0.674도에 해당한다. 이는 기구학 및 단순 응력 계산에서 얻어진 수치의 약 50% 수준으로 피로파손을 고려하여 내구한도인 50% 수준의 구동력을 고려한 것으로 이를 역으로 환산하여 비교할 경우 1% 이하의 차이를 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서, 피로파손을 고려한 회전각도 범위는 각 방향으로 0.674도이며, 단순 항복을 고려할 경우는 각 방향으로 1.36도까지 가능함을 확인하였다. Fig. 9는 이상의 관계를 정리하여 압전소자 신장량과 크랭크 링크의 회전각도 간의 관계를 보여준다. 그림으로부터 압전소자 신장량에 대한 크랭크축의 회전각도의 비는 약 0.54 rad/mm임을 알 수 있다.

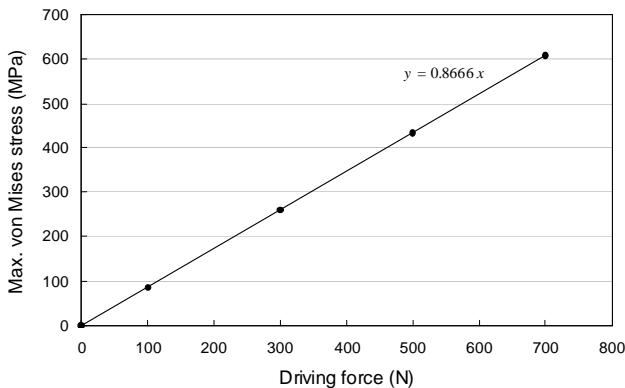


Fig. 7 The maximum von Mises stress with respect to driving force from a piezo-electric stack actuator

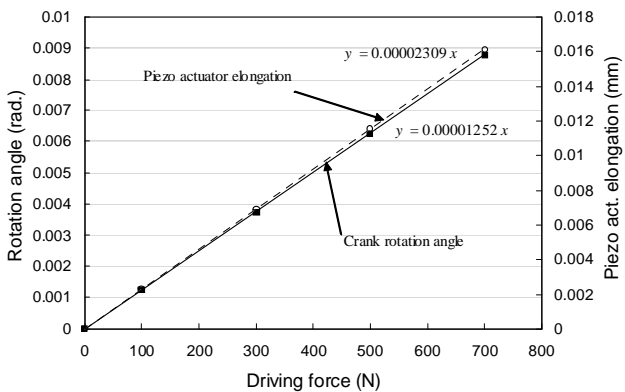


Fig. 8 Output rotation angle with respect to driving force: equivalent compliance

3. 실험장치의 구성 및 검증

본 연구에서는 설계된 회전형 초정밀이송기구의 실험적 검증을 위해 실제 이송기구를 제작하였다. 구조물의 재질은 앞에서 언급한 바와 같이 1.6 GPa의 항복강도를 가지는 스프링강으로 하였다. 플랙서의 최소폭이 0.5 mm임과 정밀한 형상으로 가공하기 위해 와이어컷방전가공(wire-cut electrical discharge machining)을 이용하였다. 압전소자는 앞에서 정의한 바와 같이 3400 N의 최대 구동력을 가지며, 30 mm의 최대 신장량을 상용의 제품을 이용하였다. Fig. 10은 실제로 제작된 회전형 초정밀위치결정기구를 보여준다.

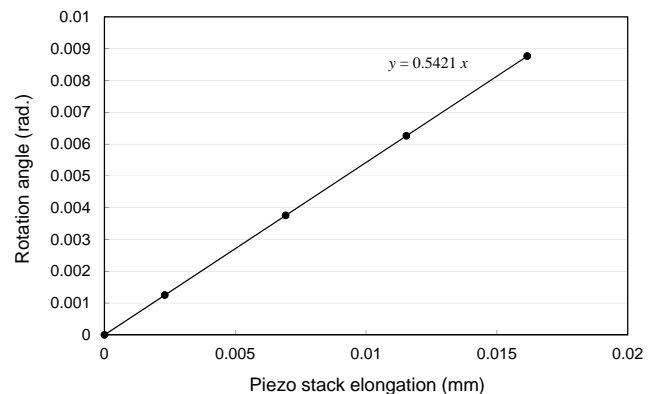


Fig. 9. Output displacements with respect to input displacement: magnification factor

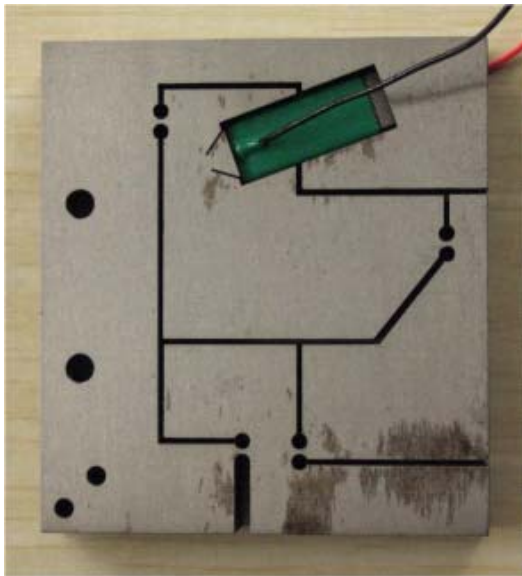


Fig. 10 Actual rotational nanoactuator equipped with a piezoelectric stack actuator

제작된 기구의 구동 특성을 확인하기 위해 용량변위계(4810, ADEtechnologies)와 제어기(UMAC, Delta-Tau), 전압증폭기(E505, PI)로 구성된 실험장치를 구성하였다. 검증실험을 위해 제어기는 개루프 상태로 이용하였으며, 별도의 제어기능은 포함시키지 않았다. 용량변위계는 크랭크 링크의 끝단 변위를 측정하여 각도로 환산하기 위해 사용하였다. 전압증폭기는 제어기로부터의 명령신호를 압전구동기의 구동전압으로 선형적으로 증폭하기 위해 사용하였다.

Fig. 11은 60 V의 전압이 압전구동기에 계단파형으로 공급되었을 때 크랭크 링크의 회전 거동을 보여준다. 그림에서 보인 바와 같이 계단파형을 가진 명령신호에 대해 이상적인 계단응답을 보임을 확인할 수 있으며, 이때 시스템이 가지는 진동특성을 포함함을 확인할 수 있다. 실험결과로부터 상승시간은 5 ms보다 짧았으며,

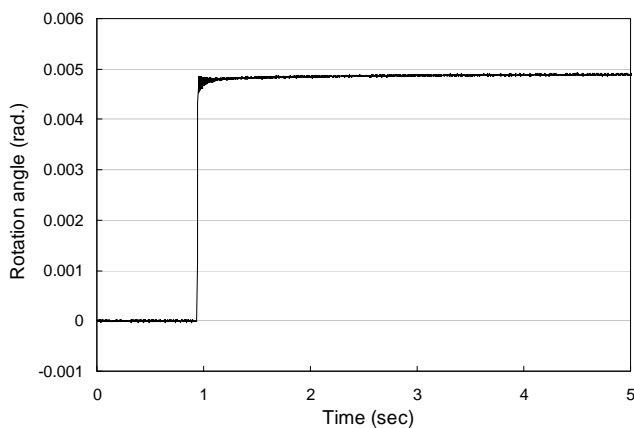


Fig. 11 Step response of rotation when the driving voltage of 60 V was given

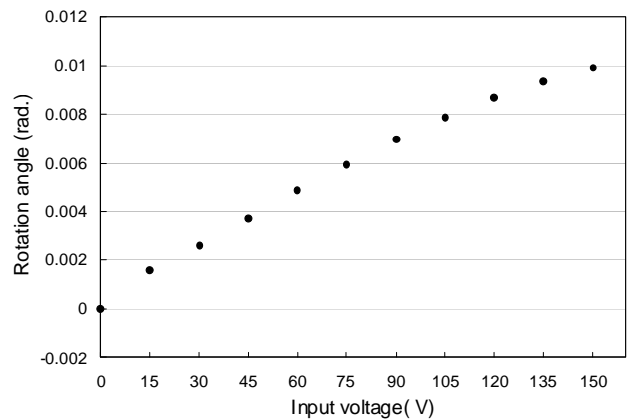


Fig. 12 Relationship between driving voltage applied to piezoelectric stack actuator and rotation angle of crank link

이는 제어기의 제어신호 전달 특성이 반영된 것으로 보이며, 실험에서 확인한 5초 동안에는 히스테리시스 거동을 보이지 않음을 확인하였다. 또한 실제 이용에서는 페루프를 구성하는 것이 일반적이므로 장시간의 히스테리시스 거동을 무시하였다. 60 V에 대한 회전각은 약 0.0048 rad으로서 약 0.28도의 회전각을 가짐을 확인하였다.

Fig. 12는 구동전압과 회전각에 대한 선형성 확인 및 최대회전각을 확인하였다. 실험에 사용된 압전소자의 최대인가전압은 150 V이므로 이 수준까지 15 V 간격으로 공급하였으며, 최대전압 공급시 압전소자는 최대성능을 발휘하므로 이때까지의 회전각을 확인하였다. 그림에서 보인 바와 같이 구성된 시스템은 실제 이용이 가능한 수준으로 선형성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최대전압에서의 회전각도는 약 0.01 rad으로서 피로파손을 고려하였을 때의 0.0118 rad보다 18% 정도 적은 값으로서 파손의 문제가 없이 작동시킬 수 있음을 확인하였다. 그림으로부터 전압과 회전각의 관계는 약 0.000074 rad/V의 비례계수를 가지는 선형관계로 정의할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 회전에 대한 초정밀위치결정이 가능한 위치결정 기구를 압전소자와 플렉서 구조물을 이용하여 제작할 수 있음을 보였다. 특히 제작된 시스템은 기존의 방법에 비해 높은 강성을 가지면서도 충분한 회전 범위를 가지는 장점이 있으며, 이를 위해 높은 증폭비를 제공할 수 있는 크랭크-레버 4절링크기구를 이용하였다. 기구학적인 설계와 함께 유한요소 기반의 응력/변형해석을 통해 보다 구체적인 설계를 수행하였다. 설계된 위치결정기구는 넓은 이송범위를 위해 스프링강을 재질로 하여 와이어컷방전가공 방법으로 제작하였으며, 성능검증을 위해 간단한 개루프구동실험을 수

행하였다. 실험결과 해석수준과 유사한 성능을 가짐을 보였으며, 최대 회전각은 시계방향으로 약 0.6도임을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발된 초정밀 위치결정기구는 반도체 및 초미세 스탬핑, 임프린팅, 초정밀 전기방사공정 등에서 웨이퍼 및 집적평판 등의 수평도 조절에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 신진연구지원 사업(NRF-2012R1A1A1015738)의 일환으로 진행되었습니다.

References

- [1] Sugihara, K., Mori, I., Tojo, T., Ito, C., Tabata, M., Shinozaki, T., 1989, Piezo electrically driven XY \ominus table for submicron lithography system, Review of Scientific Instruments 60:9 3024-3029.
- [2] Chen, H. T. H., Ng, W., Engelstad, R. L., 1992, Finite element analysis of a scanning X-ray microscope micropositioning stage, Review of Scientific Instruments 63:1 591-594.
- [3] Chen, J. S., Dwang, I. C., 2000, A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40:4 513-526.
- [4] Kwon, J. Y., Park, G. J., Ryu, W. J., Lee, C., 2013, Manufacturing Test-bench for Developing Nanopositioner, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 22:3-1 593-599.
- [5] Ye, S. D., Jeong, J. H., Min, B. H., 2004, A Study on Design and Manufacture of an Inchworm Linear Motor System, Journal of the Korean Society of Precision Engineering 21:12 174-181.
- [6] Park, J., Jeong, K., 2006, A Study on the Design and Control of a Ultra-precision Stage, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers 15:3 111-119.
- [7] Lee, J., Lee, D., Han, C., 2008, 3-DOF Parallel Micromanipulator : Design Consideration, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers 17:2 13-22.