

# 초정밀 가공을 위한 공작물 셋업 보정용 3자유도 tilting stage의 개발 Development of 3-DOF precise tilting stage for compensating ultra-precision workpiece

\*김종수<sup>1</sup>, #양민양<sup>2</sup>, 최종근<sup>3</sup>

\*J. -S. Kim<sup>1</sup>, #M. -Y. Yang (myyang@kaist.ac.kr)<sup>2</sup>, J. G. Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 기계공학과, <sup>2</sup> 한국과학기술원 기계공학과, <sup>3</sup> 순천대학교 기계우주항공공학부

Key words : Ultra - precision, Set-up compensation, Control

## 1. 서론

최근 넓은 면적에 미세한 형상이 분포된 제품이 넓은 분야에서 사용되고 있으며 위와 같은 대면적 미세형상 패턴 가공공정에서 경우 금형의 가공과 압축 사출공정에 이르기까지 공정이 복잡하고 현재는 전문가의 노하우에 의해서 공정이 이루어진다.

위의 공정에서 생겨날 수 있는 여러 가지 오차요인 중에서 공구와 공작물의 셋업 오차의 경우 금형의 기하학적 오차가 그대로 제품에 전사되기 때문에 이에 대한 오차값의 측정과 보정은 가공공정에서 중요한 부분이다.

제품의 질을 높이고 원하는 형상 정밀도 내에 드른 제품을 생산하면서 공정 시간을 단축시키기 위해서는 대면적/고하중 금형 가공에서 공작물의 셋업을 보정하고 제어할 수 있는 초정밀 마이크로 보정기술이 필요하다 하겠다.

공작물의 셋업 시 생겨날 수 있는 오차들은 x, y, z축의 병진 오차와 회전오차가 생겨 날 수 있으며 x, y축의 병진운동과 yaw모션의 경우 가공기의 이송축과 c축 회전 bed로 보정이 가능하므로 아래와 같은 design specification으로 tilt stage를 제작한다.

Table 1 Design specification of tilt stage

Maximum load capacity	200kg
Height of tilt stage	Under 100mm
Width of tilt stage	400x400(mm)
Working distance	Over 100μm
Resolution	0.05μm
Repeatability	±0.1μm

## 2. Design of System

구동부의 형태는 아래의 그림과 같이 기본 구동 actuator는 piezo actuator를 사용하고 구동량의 증폭과 구조의 compactness를 위해서 inclined bridge형태와 standing half bridge가 결합되어 있는 3개의 구동축을 이용하여 보정하는 구조로 되어 있으며 각 구동축의 설계 목표는 compact한 stage의 설계와 강인한 강성과 분해능을 기준으로 하였다.

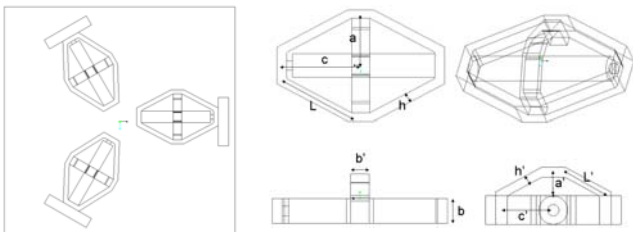


Fig. 1 Configuration of the tilt stage

위의 구조를 보게 되면 inclined bridge 안쪽에 압전소자가 위치해 있고 사이에 위치해 있는 standing half bridge의 위쪽이 공작물과 고정되게 된다. 이러한 구조를 이용함으로써 압전소자의 길이변화에 상관없이 항상 압축력이 걸리게 되어서 가이드와 actuator 사이에 갭이 생기지 않게 되고 강인한 구조를 가지게 된다.

구동부 모델링의 순서는 먼저 공작물의 하중에 의해 브릿지로 전달되는 힘을 계산하여 압전소자의 최소 구동힘을 계산하고

그 힘을 만족시키는 압전소자의 변위구동과 공작물의 하중에 의한 가이드부의 변형량을 모델링하여서 제한조건 내에 드는 가이드부의 변수를 결정한다.

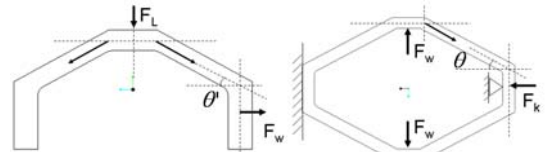


Fig. 2 Force transmission by a workpiece

공작물의 하중에 의해 압전소자에 전달되는 힘을 다음과 같다.

$$F_w = \frac{F_L}{2 \tan \theta}, \quad F_k = \frac{F_L}{2 \tan \theta \cdot \tan \theta}$$

위의 힘에 의해 가이드부에 생기는 변형량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

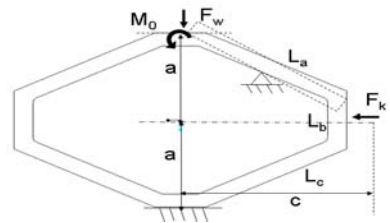


Fig. 3 Applied force in the actuating system

$F_w$  = Workpiece load

$M_o$  = Moment of mount

$F_k$  = Actuating force of the piezo actuator

$L_a, L_b, L_c$  = length of each guide

위에서 나타낸 공작물의 하중과 압전소자의 구동힘에 의한 가이드부의 변형량은 아래와 같이 나타낸다.

$$La: Ma = Mo - F_w \cos \theta \cdot x; \delta a = \int_0^L \left( \frac{Ma}{EI} \right) \left( \frac{\partial Ma}{\partial F_w \cos \theta} \right) dx$$

$$Mo - F_k \sin \theta \cdot x; \delta a' = \int_0^L \left( \frac{Ma}{EI} \right) \left( \frac{\partial Ma}{\partial F_k \sin \theta} \right) dx$$

$$Lb: Mb = Mo - F_w \tan \theta \cdot y; \delta b = \int_0^L \left( \frac{Mb}{EI} \right) \left( \frac{\partial Mb}{\partial F_w \tan \theta} \right) dy$$

$$Mo - F_k \cdot y; \delta b' = \int_0^L \left( \frac{Mb}{EI} \right) \left( \frac{\partial Mb}{\partial F_k y} \right) dy$$

$$Lc: Mc = Mo - F_w \cos \theta \cdot x; \delta c = \int_0^L \left( \frac{Mc}{EI} \right) \left( \frac{\partial Mc}{\partial F_w \cos \theta} \right) dx$$

$$Mo - F_k \cos \theta \cdot x; \delta c' = \int_0^L \left( \frac{Mc}{EI} \right) \left( \frac{\partial Mc}{\partial F_k \cos \theta} \right) dx$$

$$\begin{aligned} \delta a &= \int_0^{\frac{L}{2}} \left( \frac{Ma}{EI} \right) \left( \frac{\partial Ma}{\partial F_k \sin \theta} \right) dx - \int_0^{\frac{L}{2}} \left( \frac{Ma'}{EI} \right) \left( \frac{\partial Ma'}{\partial F_w \cos \theta} \right) dx \\ &= \int_0^{\frac{L}{2}} \left( \frac{F_k \sin \theta \cdot x}{EI} \right) dx - \int_0^{\frac{L}{2}} \left( \frac{F_w \cos \theta \cdot x}{EI} \right) dx \\ &= \frac{L^3}{24E \left( \frac{bh^3}{12} \right)} (F_k \sin \theta - F_w \cos \theta) \end{aligned}$$

위의 변형률 식을 아래의 제한 조건 하에 가이드부의 변수를 결정한다.

Table 2 Limited conditions

Length of piezo actuator	125mm
working distance	120 $\mu$ m
F <sub>w</sub>	700N
Guide material E (AL6061-T6)	68947.6MPa
Amplification	2
Guide limitation of height	40mm

위의 조건에서 가이드부의 높이 제한을 40mm로 한 것은 실제 stage에서 아랫상관과 윗 vacuum clamping 부분을 고려하였을 때에 100mm 이내로 하기위한 조건이다. 위의 조건에 의해 결정된 변수는 아래와 같다.

Table 3 Decided variables

(mm)	inclined	(mm)	Half
b	20	b'	15
h	7	h'	7
a	38.5	a'	16.5
c	72.5	c'	38.5
L	69.46	L'	37.34

위의 결정된 변수로 FEM 해석을 수행하였다.

### 3. FEM ANALYSIS

실제 제작하기에 앞서 설계된 구동부가 가지는 변형량과 증폭량을 확인하기 위해서 해석을 수행하였다.

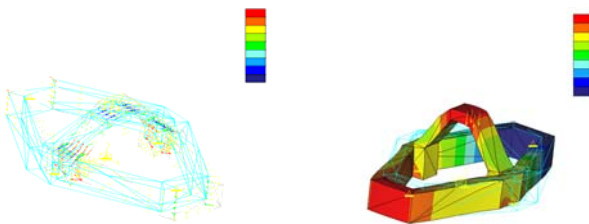


Fig. 4 Maximum stress and Amplification

Maximum stress 해석을 수행한 결과 Bridge의 꺾어지는 부분에서 159.1MPa의 집중 응력이 걸리는 것을 알 수 있었고 이는 사용한 재료(AL6061-T6)의 항복응력 240MPa 값 내에 드는 것을 확인하였다.

또한 증폭량은 Z축 방향으로 180.3 $\mu$ m의 증폭량을 가지는 것을 확인하였다.

### 4. 실험 및 결과

최종적으로 제작된 stage를 이용하여 400x400x100의 Aluminum을 하중으로 준 상태에서 최대 구동거리의 test와 분해능 test를 수행하였다.

실제 구동 test를 하였을 때에 최대 증폭량 180.3 $\mu$ m를 확인하였고 50nm step 구동을 확인하였다. 구동 시에는 PID control을 이용하여 step 구동을 수행하였으며 압저소자와 laser 변위 센서를 이용하여 구동을 측정하였다.



Fig. 5 Prototype of designed tilt stage

위는 최종 제작된 stage이다.

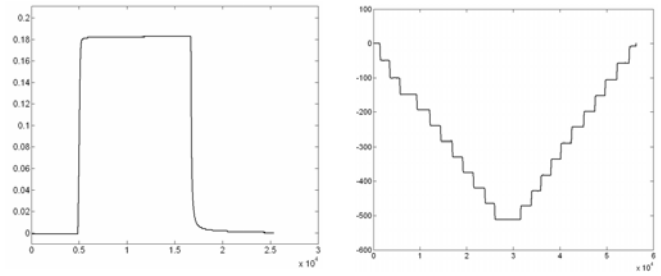


Fig. 6 Maximum moving range and 50m step test

구동 결과를 살펴보면 실제 설계한 값과 다소 차이를 보이는데 이는 실제 설계할 때에는 bridge 부분과 압전소자 그리고 vacuum과의 연결 부위가 고려되지 않았으며 나사로 연결되어 있는 부위 등의 오차로 고려되어 진다.

### 5. 결론

제작된 3DOF (Z-translation, Pitch, Roll motion) stage의 구동 성능과 강성이 원하는 spec.을 만족하는 것을 확인하였고 대면적 미세형상 가공공정에서 공작물 셋업 공정에 적용이 가능하 다 하겠다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 핵심연구개발 사업의 '대면적 미세형상 제조공정의 지능화 기술 개발'의 과제 수행 일환으로 이루어 졌다.

### 참고문헌

1. A.T. Elfizy, G.M. Bone and M.A. Elbestawi, "Design and control of a dual-stage feed drive", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, Issue 2, pp,153~165, 2005
2. Shih-Kang Kuo, Chuan-Cheng Hung, Chang-Ching Lin and Wen-Ho Yang, "Development of a nano-displacement measurement system", Translation on Mechatronics, Vol. 10, No. 1, 2006
3. Jae W. Ryu, Sung-Q Lee, Dae-Gab Gweon, Kee S. Moon, "Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism", Mechatronics 9, pp 657~674, 1999
4. Juhas, L., Vujanic, A., Adamovic, N., Nagy, L., Borovac, B. "A platform for micropositioning based on piezo legs", Mechatronics, 11/7,869-897,2001
5. Gao, P., Swei, S., Yuan, Z., "New piezoelectric precision micropositioning stage utilizing flexure hinge", Nanotechnology, 10/4:394-398
6. Kim, j.H., Kim, S.H., Kwak, Y.K., "Optimization of a Piezoelectric Actuator using Bridge-Type Hinge Mechanism", journal of the Korea Society of Precision Engineering, 20/2:168-175,2003