

PZT를 이용한 Semi-inchworm 구동기법의 초정밀 회전 스테이지 개발

윤덕원 · 안강호* · 한창수*†

한양대학교 대학원, *한양대학교 기계공학과

Development of ultra precision rotational stage using Semi-inchworm driving mechanism with PZT

Deok Won Yun, Kang Ho Ahn* and Chang Soo Han*†

Graduate school of Hanyang University

*†Dept. of Mechanical engineering in Hanyang University

ABSTRACT

Recently PZT is used in ultra precision mechanism field. PZT has a small motion range although it has a high resolution. Many methods, such as inchworm, impact driving, etc., have been applied for the expansion of the motion range. In this study, the new actuating mechanism for rotational motion with two PZT actuators is proposed. The ultra precision rotational actuator which is made by proposed mechanism is able to operate both coarse and fine motion. The design parameters of the proposed mechanism are considered to improve the performance of the system. The rotational stage which is applied by the proposed mechanism is fabricated. The resolution and velocity for fabricated rotational stage are measured by laser interferometer.

Key Words : Rotational stage, Impact drive, Inchworm drive, PZT, Semi-inchworm

1. 서 론

PZT는 큰 힘과 높은 분해능의 구동을 할 수 있어서 반도체 관련 장비나 나노 과학 기술의 연구 장비에 많이 사용된다. 하지만 높은 분해능의 구동을 할 수 있음에도 불구하고 구동범위가 수 μm 에서 수십 μm 밖에 되지 않는다는 단점이 있다. 최근에 반도체 공정이 고집적화, 대형화 됨에 따라 넓은 구동 범위 내에서 높은 분해능이 필요한 스테이지가 요구되고 있다.

지금까지 PZT의 장점을 살리기 위한 방법으로 서보모터와 PZT를 사용하여 [1] 넓은 구동범위에 높은 분해능을 갖는 시스템이 고안되었다. 또한 한 개의 PZT만을 사용하여 넓은 구동 위를 갖는 Impact drive mechanism 이 [2] 제안 되었다. Impact drive는 관성력과 최대 정지 마찰력의 차이를 이용하여 구동하는 방법이다. Impact drive는 구동 원리가 간단한 반면 가반 중량이 적고 마

찰력을 일정하게 유지해 줘야 하는 단점이 있다.

N. Shimizu 등은 3개 이상의 PZT를 이용하여 Inchworm mechanism을 고안하여 STM Tip을 구동하였다 [4]. Inchworm mechanism은 구동방향으로 변위를 갖는 PZT 한 개와 구동 가이드에 구동기를 고정할 수 있는 2개의 클램프 PZT로 구성된다. 1스텝의 이동에 6단계의 PZT구동이 필요하며 구동시의 큰 힘을 낼 수 있는 장점이 있지만 3개의 PZT를 6단계의 제어를 수행해야 하므로 제어의 어려움과 구동속도가 느리다는 단점이 있다.

본 논문에서는 두 개의 PZT를 이용하여 기존의 구동 방법을 변형한 새로운 구동 메커니즘을 제안하고 대 변위와 미소 변위를 동시에 구현하는 회전형 스테이지를 제작하였다.

2. Semi-inchworm 구동방법의 제안

새롭게 제안하는 구동 메커니즘은 Fig. 1과 같다. 메

*E-mail : cshan@hanyang.ac.kr

커니즘은 두 개의 왕복운동이 가능한 PZT로 구동되는 Tip과 한 개의 고정된 Tip, 그리고 움직임이 가능하도록 가이드가 되어 있는 Driving target으로 구성되어 있다. 각각의 Tip과 Driving target과의 마찰력이 일정하다고 가정하고 그때 존재하는 마찰력은 정지 마찰력과 운동 마찰력으로 단순화 한다면 Driving target은 마찰력의 합력 방향으로 움직이려는 경향을 갖게 된다. 만약 구동하는 2개의 Tip중 한 개만 움직인다면 Driving target는 정지해 있고 (Fig. 1, 2, 3) 2개의 Tip이 같은 방향으로 동시에 움직인다면 Driving target는 Tip의 방향으로 움직이게 된다(Fig. 1-4). Driving target을 높은 분해능으로 구동하고자 한다면 2개의 Tip을 같은 방향으로 이동시키면 된다. 만일 PZT의 구동범위 밖의 영역에 Driving target을 위치하고자 한다면 Fig. 1의 구동방법을 반복 한다.

구동에 필요한 신호는 Fig. 2와 같다. 구간 1은 유희 상태이며 구간 2와 3은 2개의 구동 가능한 Tip이 Driving target와 slip 현상을 유도하기 위하여 구동시의

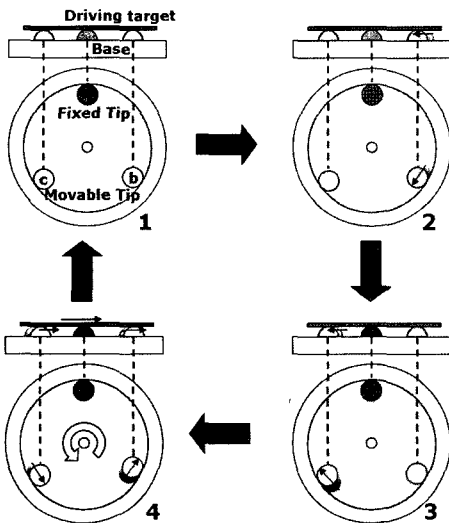


Fig. 1. Schematic diagram of proposed driving mechanism.

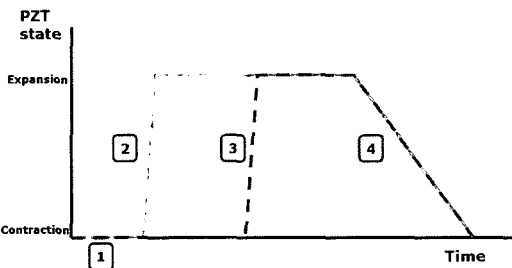


Fig. 2. Driving signal of proposed driving mechanism.

가속도가 마찰력을 극복할 정도로 빠르게 이동하는 것이다. 구간 4는 Tip과 Driving target간의 stick현상을 유도하기 위하여 가속도를 마찰력보다 적게 하여 이동시켜서 Driving target을 움직이게 된다.

이러한 구동을 가능하게 하기 위한 조건은 D'Alembert의 원리에 의해 다음과 같다.

$$a_b > \frac{1}{M}\mu_b N_b, a_c > \frac{1}{M}\mu_c N_c \tag{1}$$

$$a_{b,c} < \frac{1}{M}(\mu_b N_b + \mu_c N_c - \mu_a N_a) \tag{2}$$

여기에서 a_b, a_c 는 Tip b와 c의 가속도이며 M 은 Driving target의 무게 혹은 그에 상응하는 관성 모멘트이다. 또한 μ_a, μ_b, μ_c 은 각각의 Tip과 Driving target에 작용하는 마찰계수이다. 구간 2, 3에서는 (1)과 같은 조건으로 Tip을 구동하여야 하고 구간 4에서는 (2)와 같은 조건으로 Tip을 구동해야 한다. 만약 구동 시스템의 3개의 Tip과 Driving target의 마찰계수가 같다고 가정하면 두 개의 Tip의 상태에 따라 Driving target의 움직임이 결정 되므로 구동 방법은 더 간단하게 된다. 하지만 실제 시스템에서는 마찰력이 차이가 발생하게 되므로 1개의 Tip이 구동할 때 가급적 큰 가속도로 구동 하는 것이 구동에 유리하다.

Table 1은 새롭게 제안된 mechanism을 Inchworm과 Inertial sliding와 비교한 것이다. 새롭게 제안된 mechanism은 다른 두 가지 방법의 장점들을 갖는다. 1회 구동을 위해 반복되는 단계를 줄임으로 Inchworm에 비해 속도를 향상시킬 수 있으며 Plate와의 접촉면이 Inertial sliding보다 많으므로 더 큰 힘을 발생시킬 수 있다. 또한 상대적으로 Inchworm보다 구동과 제어방법이 간단해 진다.

Table 1. The comparison between new mechanism and other mechanism.

| | Inchworm | Inertial sliding | New mechanism |
|----------------|-----------|------------------|---------------|
| Number of PZT | 3 | 1 | 2 |
| Number of step | 6 | 2 | 4 |
| Force | Very high | Low | High |
| Speed | Slow | Fast | Middle |
| Control | Difficult | Easy | Easy |

3. Semi-inchworm을 이용한 회전 스테이지 구현

PZT는 팽창시 큰 힘을 발생시키는 반면 수축시에는

일반적으로 팽창시의 약 1/500의 힘으로 수축한다. 이러한 PZT의 동적 성능 향상을 위해 PZT에 스프링 타입의 예압 구조를 적용하였다. PZT의 강성은 크기에 따라 차이가 있지만 약 200 N/μm 정도로 매우 크므로 [5]고 강성의 양단 고정보를 적용 하였다. 양단 고정보의 탄성계수는[7]

$$k = \frac{P}{y} = \frac{192EI}{l^3} \quad (3)$$

식 (3)과 같다. 이 식에서 E는 재료의 Young's modulus이고 I는 구조의 면적관성 모멘트이며 l은 보의 길이 이다. 예압 구조가 원활한 작용을 하도록 본 연구에서는 PZT와 예압 구조의 강성이 같도록 설계하였다.

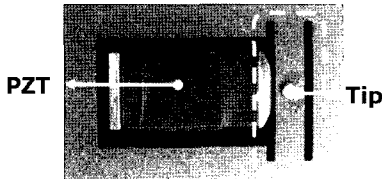


Fig. 3. Fixed-fixed beam for PZT preload and driving tip.

제안되어진 메커니즘은 마찰력과 관성력을 이용한 방법이므로 메커니즘을 적용하기 위해서는 안정적이며 일정한 마찰계수를 유지할 수 있는 재료가 사용되어야 한다. 본 연구에서는 위와 같은 조건을 만족하기 위하여 알루미늄을 사용하였다. 알루미늄의 경도는 모스경도계로 9이며 용도에 맞게 가공한 알루미늄을 경면 가공하여 적용하였다.

직선으로 구동하는 PZT를 이용하여 회전운동을 구현하려면 회전을 지지하는 베어링의 정밀도가 중요한 요소가 된다. 현재까지 개발되어진 베어링 중 정밀도가 우수하여 여러 초정밀 구동 장치에 적용이 되는 크로스 롤러 베어링을 사용하였다. 크로스 롤러 베어링에 구동 축을 억지 끼워 맞추고 축 방향으로 예압을 가하여 베어링에 의해 발생하는 백래쉬를 최소화 하였다.

4. 회전 스테이지의 성능 측정

Semi-inchworm 구동 메커니즘을 적용한 초정밀 회전 스테이지를 Fig. 4와 같이 설계하고 제작 하였다. 제작 되어진 스테이지의 PZT만으로 구동하는 미소 변위의 분해능과 미소 변위시의 주파수 응답을 분석하였다.

Fig. 5는 회전 스테이지의 미소 구동시 각도 분해능이다. 미소 변위시 최대 구동 범위는 약 6.8×10^{-3} Degree이며 각도 분해능을 측정하기 위하여 스테이지

에 미소한 양의 계단입력을 가하였다. 분해능의 측정은 일정한 변위가 증가할 때 엔코더 신호를 출력하는 레이저 간섭 변위계를 사용하였고 측정 분해능은 2.85×10^{-5} Degree/pulse이다.

Fig. 5에서 입력 값에 응답이 지연되는 이유는 분해능 측정 시 입력 값에 도달 할 때까지 PZT에 인가하는 전압을 천천히 변화 시켰기 때문이다. 측정되어진 스테이지의 분해능은 약 5.7×10^{-5} Degree/step 보다 작을 것으로 추정되며 이는 PZT의 구동 분해능이 레이저 간섭 변위 측정기보다 작은 것에 기인한다.

Fig. 6은 스테이지의 미소 변위 주파수 응답곡선이다. 이는 미소 구동시 정밀한 위치 결정을 위하여 최대 변

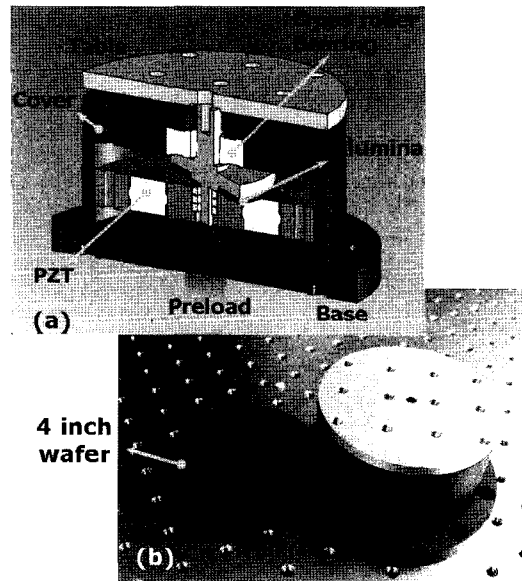


Fig. 4. (a) Concept design of rotational stage, (b) fabricated rotational stage.

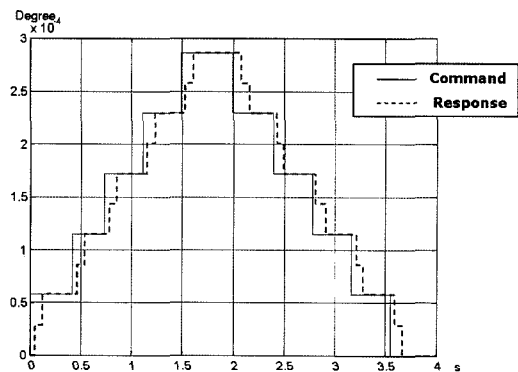


Fig. 5. Multi step response of ultra precision rotational stage.

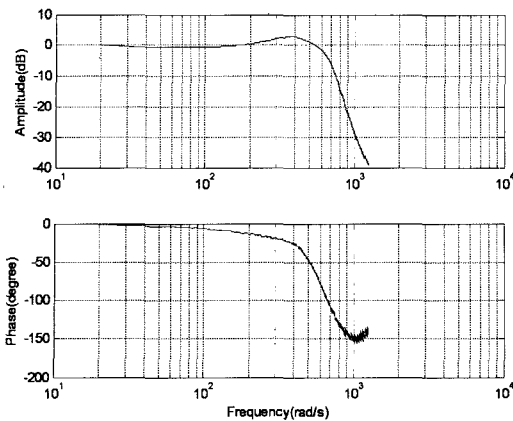


Fig. 6. Frequency response of ultra precision rotational stage.

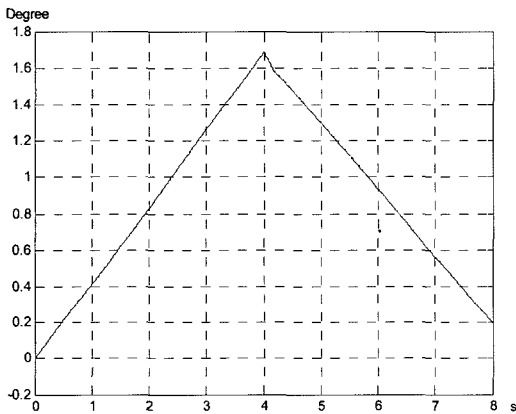


Fig. 7. Coarse motion speed of fabricated rotational stage.

위 내에서 제어 신호에 얼마나 빨리 반응하는가에 대한 정보를 알 수 있다. 미소 변위 구동시 회전 스테이지의 bandwidth는 약 600 rad/s 이며 이는 약 88 Hz이다. 예압 구조를 적용하였음에도 불구하고 스테이지의 bandwidth가 PZT의 bandwidth보다 작은 이유는 PZT 구동 앰프의 응답성능이 PZT의 응답성능보다 상당히 느리기 때문이다.

스테이지를 미소 변위시 최대 구동 범위 보다 더 많이 회전시켜야 할 경우 제안된 구동 메커니즘을 적용하여 구동한다. 제안된 구동 메커니즘을 반복하면 스테이지를 구동범위에 제한을 받지 않고 사용할 수 있다. 스테이지의 위치 제어는 목표 위치까지 제안된 구동 메커니즘으로 접근한 뒤 PZT의 높은 분해능을 이용한 미소 구동으로 위치 제어 오차를 최소화 한다. 이런 방법을 이용하여 회전 스테이지의 모든 범위 내에서 높은 분해능으로 위치 결정을 할 수 있다.

Fig. 7은 제안된 메커니즘을 적용하여 빠른 속도로 구동한 모습이다. 회전 스테이지의 최고속력은 약 0.42 Degree/s이다.

5. 결 론

본 연구에서는 두 개의 PZT를 이용한 새로운 구동 메커니즘을 제안하였다. 또한 새로운 메커니즘을 적용하여 넓은 범위에서 높은 분해능을 구현하는 초정밀 회전형 스테이지를 제작하였다. PZT의 동적 성능 향상을 위해 고강성의 스프링 예압 구조를 적용하였고 일정한 마찰력을 구현하기 위하여 경도가 높고 마멸에 강한 알루미늄을 경면 가공하여 사용하였다. 구동기의 성능을 측정하기 위하여 레이저 간섭 변위계를 사용하였다. 스테이지의 최대 구동속도는 0.42 Degree/s 이고 분해능은 5.7×10^{-5} Degree/step 이다. 하지만 구동 분해능 측정 시 PZT의 구동 분해능이 측정 장비의 분해능보다 더 높으므로 실제 스테이지의 분해능은 측정값보다 더 작을 것으로 예상된다.

개발 되어진 회전 스테이지는 수 nm급의 정렬 오차를 갖는 mask aligner의 align 스테이지로 적용 가능할 것으로 판단되며, 진공용 재료를 이용하여 제작 하면 진공중에서도 사용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 성장동력 중기거점/차세대신기술개발사업의 일환인 “지능형 극초정밀 생산로봇 기술 개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Heui Jae Phak, Dong Sung Lee, Jong Ho Park, 2001, “Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.41, p.51-63.
2. T. Higuchi, Y. Yamagata, K. Furutani and K. Kudoh, 1990, “Precise positioning mechanism utilizing rapid deformations of piezoelectric elements”, Proceedings An Investigation of Micro Structure, Sensors, Actuators, Machines and Robots., p.222-226.
3. S. Kleindiek, H. S. Kim, E. Kratschmer and T. H. P. Chang, 1995, “Miniature three-axis micropositioner for scanning proximal probe and other applications”, Journal of Vacuum Science Technology., Vol.13(6),

- p.2653-2656.
4. N. Shimizu, T. Kimura, T. Nakamura and I. Umebu 1990, "An Ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope with a new inchworm mechanism", *Journal of Vacuum Science Technology.*, A8(1), p.333-335.
 5. PI co. Micropositioning, nanopositioning, nanoautomation solution for cutting-edge technologies. pp. 4-26.
 6. M. L. James, G. M. Smith, J. C. Wolford, P. W. Whaley "Vibration of Mechanical and Structural Systems with microcomputer applications" HarperCollins College Publish.
 7. Deokwon Yun, Hyeunseok Choi, Changsoo Han, Hunjong Choi, Wonpyo Hong, Eungoo Kang, "Development of manipulator for handling micro components in vacuum", *Korean Society of Machine Tool Engineering 2005 spring conference.* pp.40-43.