

## 미세 부품 조작을 위한 탄성힌지 기반 압전소자 구동형 초정밀 머니플레이션 시스템

### A Piezo-driven Fine Manipulation System Based on Flexure Hinges for Manipulating Micro Parts

최기봉\*, 이재종, 김기홍, 고국원  
(Kee-Bong Choi, Jae Jong Lee, Gee Hong Kim, and Kuk Won Ko)

**Abstract:** This paper presents a manipulation system consisting of a coarse/fine XY positioning system and an out-of-plane manipulator. The object of the system is to conduct fine positioning and manipulation of micro parts. The fine stage and the out-of-plane manipulator have compliant mechanisms with flexure hinges, which are driven by stack-type piezoelectric elements. In the fine stage, the compliant mechanism plays the roles of motion guide and displacement amplification. The out-of-plane manipulator contains three piezo-driven compliant mechanisms for large working range and fine resolution. For large displacement, the compliant mechanism is implemented by a two-step displacement amplification mechanism. The compliant mechanisms are manufactured by wire electro-discharge machining for flexure hinges. Experiments demonstrate that the developed system is applicable to a fine positioning and fine manipulation of micro parts.

**Keywords:** stack-type piezoelectric element, fine manipulation, compliant mechanism, flexure hinge

#### I. 서론

최근의 LCD TV의 후광용 광원은 수 백 개의 마이크로 LED를 어레이 형태로 배치하여 사용하고 있다. 이 때 LED 광원의 조립 공정에서 개별 LED와 렌즈 유닛의 조립 각도는 성능에 중요한 영향을 미치므로 생산성과 품질향상을 위한 초정밀 조립이 요구된다. 또한 조립 후 자동 검사기술 및 검사 후 LED 자세의 보정기술의 필요성이 대두되고 있다. LED 유닛의 자세의 보정을 위해서는 LED 유닛의 상부에서 3점을 점접촉으로 지지한 후, 각 지지점에서 상하 운동이 가능한 3축 면외구동용 초정밀 미세 머니플레이터에 의해 LED 유닛의 틸트 조절이 요구된다. 여기서 초정밀 미세 머니플레이터는 적층형 압전소자를 구동원으로 하는 탄성힌지 메커니즘이 적합하다.

압전소자는 초정밀 센서 뿐만아니라 구동분야인 초정밀 액추에이터로도 널리 활용되고 있다. 압전소자 중 적층형은 바이모프형에 비해 구동변위는 작으나 큰 힘을 발생시킬 수 있기 때문에 초정밀 위치결정용 스테이지 및 고속 스캐너에 응용된다[1,2]. 적층형 압전소자를 구동원으로 채택한 스테이지 및 스캐너는 압전소자에서 발생된 운동을 원하는 방향으로 운동을 제어하기 위해 운동안내기구의 관절 부위에 기존의 베어링을 이용하기 보다는 탄성힌지의 조합에 의한 운동안내 방식이 보다 효과적이다.

탄성힌지는 하나의 물체를 가공하여 일체형으로 제작한 미세 스프링으로, 탄성범위 내에서 선형성이 우수하며, 비접

촉·무마찰 구동이 가능하기 때문에, 청정환경 하에서 초정밀 운동을 요구하는 시스템에 응용이 가능하다. 따라서 마이크로/나노 구동용 스테이지 및 머니플레이터에 탄성힌지에 의한 구동 메커니즘의 적용이 매우 활발히 이루어지고 있다[3-5].

초정밀 운동안내 메커니즘에 이용되는 탄성힌지는 노치형 힌지와 복합형 힌지로 구분할 수 있다. 노치형 힌지는 원형 노치 힌지, 타원노치 힌지 및 판형 힌지 등이 있다[6,7]. 노치형 힌지의 경우 힌지의 회전변형을 크게 하기 위해서는 노치의 목을 길고, 가늘게 해야 한다. 그러나 노치의 목이 너무 가늘 경우 큰 회전변위에서 응력집중현상이 일어나 재료의 항복을 초래할 가능성이 내재하고 있다. 복합형 힌지는 노치형 힌지 들의 조합으로 구성된 힌지 메커니즘으로 회전운동을 발생시킨다. 대표적인 복합형 힌지로는 십자형 힌지를 들 수 있다. 이 힌지는 단일체로 가공이 가능하며, 노치형 힌지에 비해 더 큰 회전 변위를 구현 가능한 장점이 있다.

적층형 압전소자를 구동원으로 사용할 때 구동변위가 압전소자 길이의 1/1000 이하이기 때문에, 응용처에 따라서 변위를 확대해야 할 필요성이 대두된다. 변위확대에는 탄성힌지에 의한 지렛대 메커니즘[6] 및 브릿지 메커니즘[8-10]이 사용된다. 전자의 경우 구조는 간단하지만 증폭비가 커질수록 지렛대의 길이가 길어지는 단점이 있다. 반면 후자는 동일한 체적 하에서 브릿지의 각도를 조절함에 따라 증폭비를 변화시킬 수 있지만 증폭비가 직관적이지 않기 때문에 해석을 통해서 확인해야 하며, 그 구조는 지렛대 방식에 비해 복잡한 것이 단점이다.

본 논문에서는 미세 부품의 초정밀 위치결정을 위한 조/미동위치결정용 시스템 및 미세 조작을 위한 3점 지지형 면외 머니플레이터로 구성된 새로운 미세 부품조작용 머니플레이션 시스템을 탄성힌지를 이용하여 제안한다. 조/미동 위치결정을 위해 조동 스테이지는 스텝모터 구동형 XY 스테이지로 구현하며, 미동 위치결정은 탄성힌지에 의해 2축 운동을 안

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 15., 채택확정: 2009. 6. 15.

최기봉, 이재종, 김기홍: 한국기계연구원 나노융합기계연구본부

(kbchoi@kimm.re.kr/jilee@kimm.re.kr/geehong@kimm.re.kr)

고국원: 선문대학교 정보통신공학과(kuks2309@sunmoon.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 성장동력 중기거점/차세대신기술개발사업 및 한국연구재단 글로벌네트워크지원사업(KRF-2008-220-D00012)에 의해 지원, 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

내하는 압전소자 구동형 스테이지에 의해 구현한다. 또한 면 외 머니플레이터의 선형운동을 위해서는 압전소자에 의해 구동하는 대변위 탄성힌지 메커니즘에 의한 선형 구동기를 제안한다. 3대의 선형 구동기를 120° 간격으로 원형으로 배치하여 3점 지지형 면의 머니플레이션을 구현한다. 설계에 의해 와이어 방전가공으로 탄성힌지 메커니즘을 가공한 후 미동 XY 스테이지 및 면외 머니플레이터를 제작한다. 또한 제작된 스테이지 및 면외 머니플레이터의 실험을 통해 개발된 시스템이 미세 부품의 초정밀 위치결정 및 미세 조작에 적합함을 증명하고자 한다.

**II. 미세부품 조작용 머니플레이션 시스템**

미세부품 조작을 위해서 그림 1과 같은 머니플레이션 시스템을 제안한다. 이 시스템은 부품의 초정밀 위치결정을 위해 하부에 조/미동용 XY 스테이지가 장착되며, 상부에는 3점 지지형 미세부품 조작용 면외 머니플레이터가 장착된다. 여기서 3점지지용 면외 머니플레이터는 3개의 선형 구동기로 구성된다.

조/미동 XY 위치결정용 시스템에서 조동 스테이지는 스텝 모터로 구동된다. 각 스텝모터의 분해능 내에서 미세운동은 미동 스테이지가 담당한다. 미동 스테이지의 적층형 압전소자에 의해 구동되며, 압전소자에서 발생된 변위의 확대 및 운동의 안내에는 탄성힌지 메커니즘이 이용된다. 이 때 미동 스테이지는 50 μm 이상의 변위와 50 nm 이하의 분해능이 요구된다.

면외 머니플레이터에 의해 미세 부품은 수직축 운동 및 롤(roll)과 피치(pitch)의 면외 회전운동이 가능해야 한다. 면외 머니플레이터의 각 선형 구동기는 120° 간격으로 원형으로 배치되어 있어 LED 유닛과 같은 미세 부품의 상부를 탐침으로 눌러 미세 부품이 수직축 및 두 면외 회전방향으로 운동할 수 있도록 작동한다. 이 때 각 선형 스테이지는 미세 부품의 크기와 미세 조정을 위한 경사각을 고려하여 최대 300 μm의 변위와 500 nm의 분해능이 가능해야 한다.

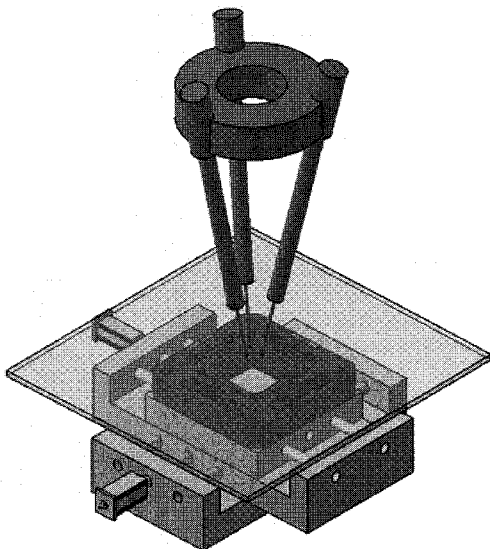


그림 1. 초정밀 머니플레이션 시스템의 개념설계.  
Fig. 1. Conceptual design of a fine manipulation system.

**III. 미동 XY 스테이지**

미동 스테이지는 요구된 최대변위와 분해능을 고려할 때 압전소자를 구동원으로 탄성힌지에 의한 안내 메커니즘을 구현해야 한다. 또한 압전소자의 변위가 매우 작기 때문에 탄성힌지에 의한 변위증폭 메커니즘도 함께 탑재되어야 한다. 그림 2는 탄성힌지 메커니즘에 의해 탄성힌지의 변위증폭과 운동안내를 함께 수행할 수 있는 미동 스테이지의 구조이다. 탄성힌지 메커니즘에 X, Y 방향의 운동을 발생시키기 위한 2개의 적층형 압전소자, 두 방향의 운동을 측정하기 위한 2개의 용량형 센서로 구성된다.

메커니즘의 설계는 주어진 스테이지의 외곽 치수 내에서 탄성힌지의 형태를 결정하고 치수를 결정하는 것이다. 탄성힌지는 판형 힌지를 채택하여, 공진주파수 및 최대변위와 이때의 최대응력이 허용치를 만족하도록 판형 힌지의 치수를 계산하였다. 또한 ANSYS를 이용하여 설계된 메커니즘이 허용치를 만족하는지 조사하였다.

그림 3은 ANSYS를 이용한 FEM 정해석 결과이다. X 및 Y 축의 적층형 압전소자가 변위를 발생시킨다고 가정한 후 변위 및 각 탄성힌지에서 발생하는 응력을 해석하였다. 적층형

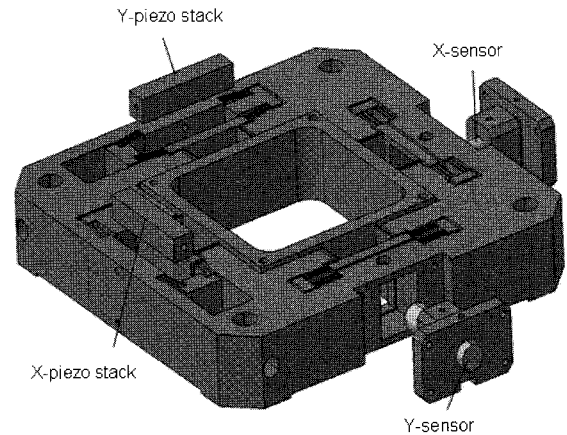


그림 2. 탄성힌지 메커니즘으로 구현된 미동 스테이지의 구조.  
Fig. 2. Structure of a fine XY stage implemented by compliant mechanism.

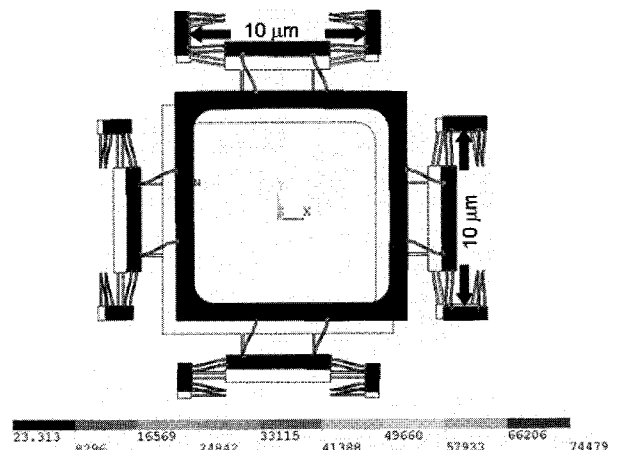


그림 3. 미동 스테이지용 탄성힌지 메커니즘의 정해석.  
Fig. 3. Static analysis of a compliant mechanism for fine motion.

압전소자에서 각각 각각 10  $\mu\text{m}$ 의 변위가 발생되었을 때 가동부는 75  $\mu\text{m}$ 가 발생되었다. 또한 이 때의 최대응력은 내측의 탄성힌지의 양단에서 발생되었으며 최대 74 MPa에 도달하였다. 이 것은 제작하고자 하는 재료의 항복응력인 505 MPa에 미달되므로 허용 가능하다.

미동용 스테이지용 탄성힌지 메커니즘의 모드해석을 FEM을 이용하여 수행하였다. 저주파 영역에서 그림 4와 같이 3개의 모드가 발생되었다. 594 Hz에서 두 개의 병진 모드가 발생되었으며, 988 Hz에서 회전 모드가 발생되었다. 두 병진 모드는 운동방향이 서로 직교하는 모드이다. 회전 모드는 제어할 수 없는 모드로서 병진모드의 1.6배 이상 되는 고주파 모

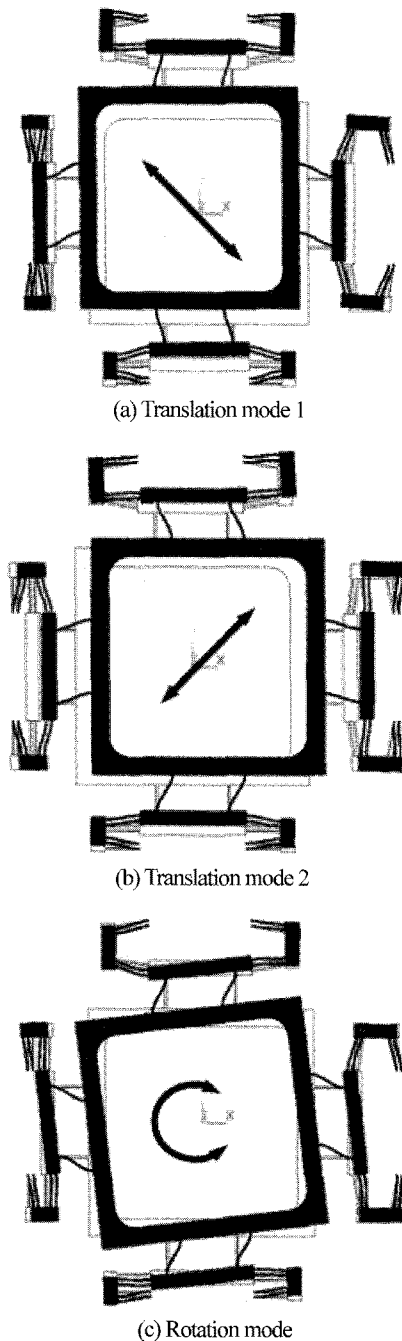


그림 4. 미동 스테이지용 탄성힌지 메커니즘의 모드해석.  
Fig. 4. Modal analysis of a compliant mechanism for fine motion.

드이며 원하지 않는 기생운동이 발생되나, 병진모드에 비해 운동의 크기가 매우 작기 때문에 실제 동작에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 고려된다.

설계된 미동 스테이지는 그림 5와 같이 제작되었다. 재질은 AL-7075이며, 와이어 방전가공을 이용하여 가공하였다. 가공된 메커니즘에 2개의 적층형 압전소자 및 2개의 용량형 센서를 장착하여 미동 스테이지를 완성하였다.

제작된 미동 스테이지의 적층형 압전소자를 제외한 탄성힌지 메커니즘에 임팩트로 가진시켜 그림 6과 같은 주파수 응답을 얻었다. 실험결과 1 kHz 미만의 주파수 특성에서 572.7 Hz의 피크 및 936.4 Hz의 피크가 관찰되었다. 첫 번째 피크는 병진모드로 해석되며, 두 번째 피크는 기생하는 회전 모드로서 해석된다. 이 들 결과는 FEM 해석결과와 매우 유사하다.

압전소자에 -30 V에서 150 V 사이의 전압을 인가하여 가동부의 변위를 그림 7과 같이 측정하였다. 인가전압을 0에서 150 V까지 증가시킨 후 다시 -30 V까지 감소시키며, 그 후 또

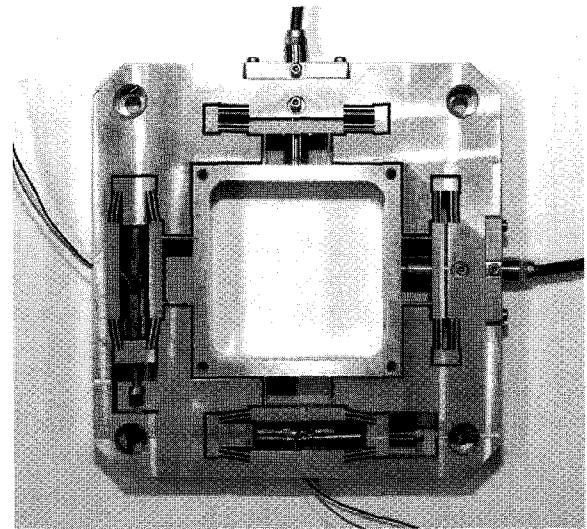


그림 5. 미동 스테이지.  
Fig. 5. Fine stage.

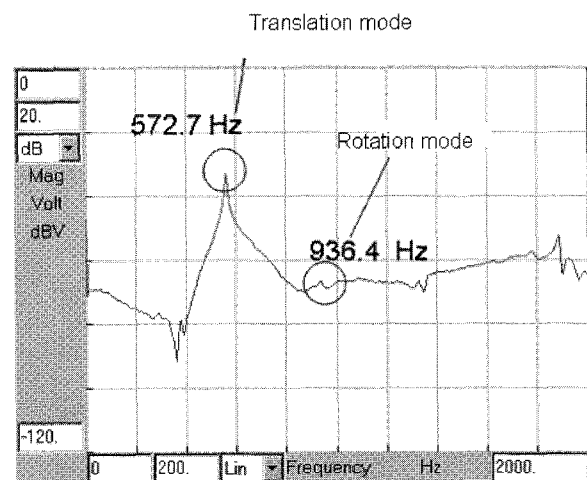


그림 6. 임팩트 테스트.  
Fig. 6. Impact test.

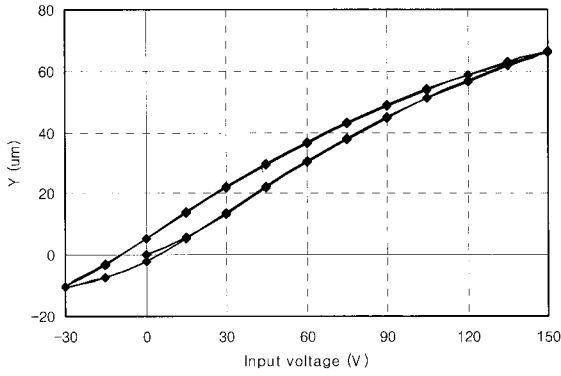


그림 7. 구동범위.  
Fig. 7. Working range.

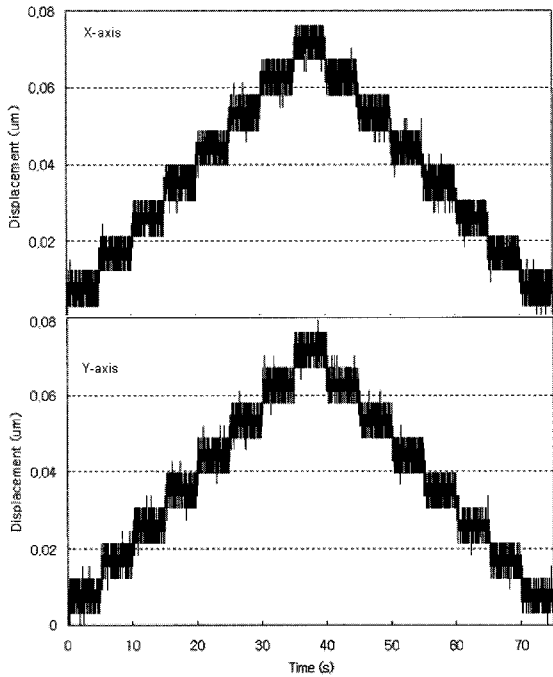


그림 8. 분해능 테스트.  
Fig. 8. Resolution test.

다시 150 V까지 증가시켜 가며 변위를 측정된 결과 약 70  $\mu\text{m}$ 의 구동범위를 얻었다. 또한 실험결과에서 히스테리시스 현상이 관찰되었다. 이것은 개회로 상태에서 압전소자의 히스테리시스가 메커니즘에 그대로 반영되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 위치측정에 의한 폐회로 제어 시스템을 통해서 보상할 수 있다.

비례-적분 제어를 통해서 미동 스테이지의 분해능을 그림 8과 같이 측정하여 약 9 nm의 분해능이 관찰되었다. 실험결과 개발된 미동 스테이지는 요구 성능을 만족함을 알 수 있다.

**IV. 면의 머니플레이터용 선형 구동기**

면의 머니플레이터를 구성하는 선형 스테이지는 최대변위와 분해능을 고려할 때 압전소자를 구동원으로 하는 선형 스테이지로 구성하는 것이 적합하다. 그러나 압전소자의 변위는 수십  $\mu\text{m}$  정도에 불과하기 때문에 300  $\mu\text{m}$  이상의 선형 변위를 얻기 위해서는 변위확대 기구를 사용한 탄성힌지 메커니즘을 설계해야 한다.

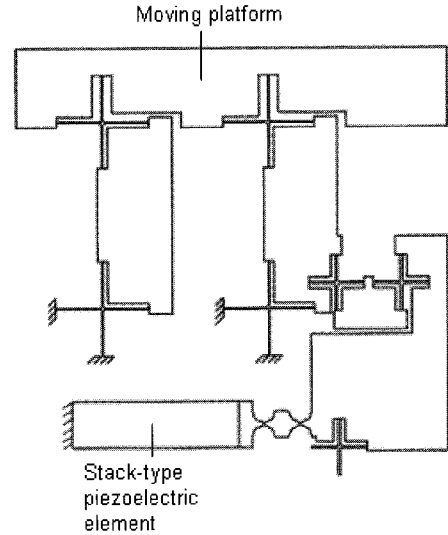


그림 9. 대변위용 탄성힌지 메커니즘의 구조.  
Fig. 9. Structure of a compliant mechanism for large displacement.

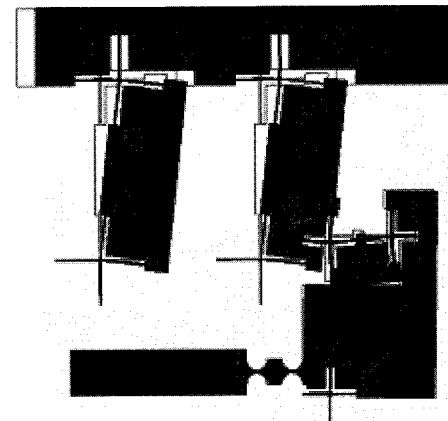


그림 10. FEM 해석.  
Fig. 10. FEM analyses.

니즘을 설계해야 한다. 압전소자의 미세 변위를 확대하기 위해 2단 지렛대 메커니즘 사용한다. 그림 9는 본 논문에서 제안하는 압전소자 구동형 대변위 힌지 메커니즘의 구조이다. 이 메커니즘은 7개의 링크와 7개의 십자형 힌지, 2개의 원형 노치 및 1개의 적층형 압전소자로 구성된다. 여기서 압전소자는 구동원으로 작용한다. 회전관절의 십자형 힌지는 이동 플랫폼의 변위가 클 때 각 관절에서 발생하는 큰 회전변형으로 인한 과도한 응력집중을 노치형 힌지에 비해 경감시키는 효과를 가지고 있다.

설계된 메커니즘의 사이즈는 93.5 mm  $\times$  97 mm  $\times$  10 mm이며, 사용된 압전소자의 사이즈는 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  36 mm이다. 설계된 메커니즘을 FEM을 이용하여 해석하였으며, 그 결과는 그림 10과 같다. FEM 해석결과 이 메커니즘은 최대 310  $\mu\text{m}$ 의 변위와 십자형 힌지의 중심부에 최대 150 MPa의 응력이 발생하였다.

설계를 기반으로 압전소자 구동형 선형 메커니즘을 그림 11과 같이 제작하였다. 실험을 통해 개발된 탄성힌지 메커니즘은 그림 12와 같이 최대 300  $\mu\text{m}$ 의 구동영역을 갖는 것이

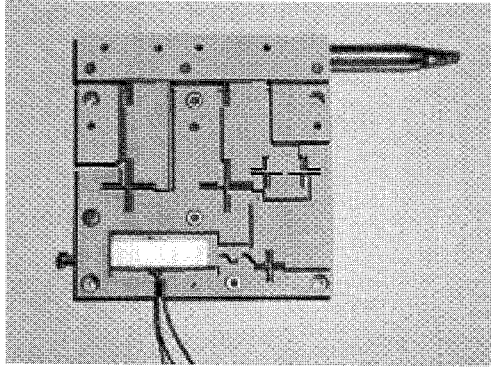


그림 11. 압전소자 구동형 선형 구동기.  
Fig. 11. Piezo-driven linear compliant actuator.

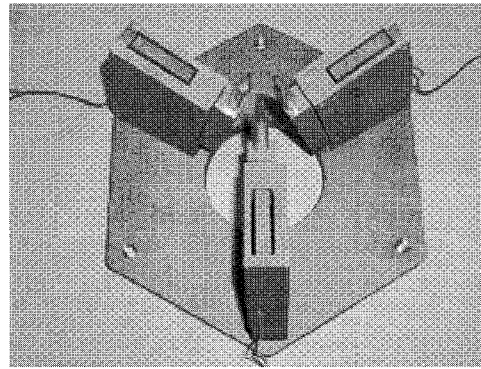


그림 14. 면의 머니플레이터.  
Fig. 14. Out-of-plane manipulator.

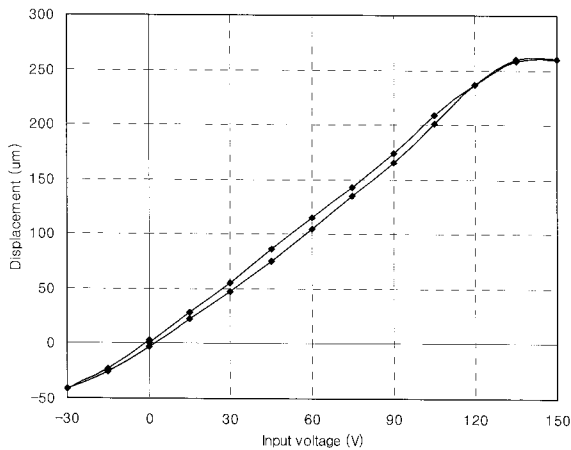


그림 12. 선형 구동기의 구동영역.  
Fig. 12. Working range of a linear compliant actuator.

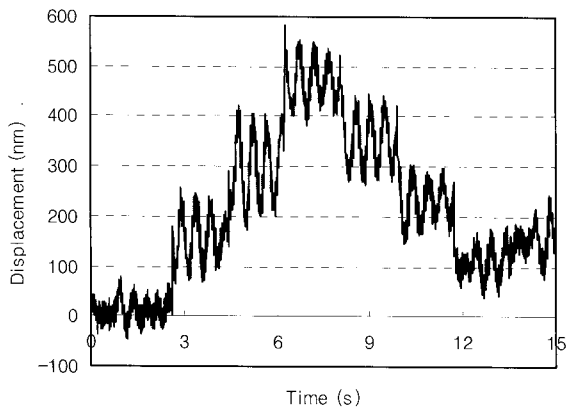


그림 13. 분해능 실험.  
Fig. 13. Resolution test.

확인 되었다.  
압전소자에 스트레인게이지 센서를 부착하여 비례-적분 제어를 수행하여 선형 구동기의 분해능을 그림 13과 같이 구했다. 그림에서와 같이 약 200 nm의 분해능이 달성되었다. 그러나 제어를 수행할 때 제어하고자 하는 팁 부분의 변위를 측정하지 않고, 압전소자의 변위를 측정했기 때문에 팁 부분에 잔여진동이 발생하였다. 이 잔여진동은 메커니즘의 강성이 작기 때문에 압전소자의 구동력에 의해 팁 부분이 공진주

파수로 진동하기 때문이다.  
개발된 선형 구동기 3개를 그림 14와 같이 120° 간격으로 원형 배치한 3점지지 면의 머니플레이터를 개발하였다. 각 선형 구동기의 팁에는 바늘이 설치되어 있어 미세 공간에서 점 접촉에 의한 선형구동이 가능하도록 하였다. 선형 구동기의 분해능을 기반으로 분해능을  $0.6 \times 10^{-3}$ °의 면의 운동용 회전 분해능을 얻었다.

**V. 결론**

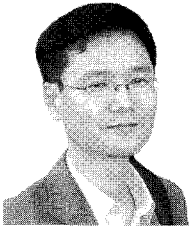
본 논문에서는 미세 부품의 초정밀 위치결정을 위한 조/미동 위치결정용 시스템 및 미세 조작을 위한 3점 지지형 면의 머니플레이터를 제안하였다. 조/미동 위치결정을 위해 조동 스테이지는 스텝모터 구동형 XY 스테이지로 구현하며, 미동 위치결정은 탄성힌지에 의해 2축 운동을 안내하는 압전소자 구동형 스테이지에 의해 구현하였다. 또한 면의 머니플레이터의 선형운동을 위해서는 압전소자에 의해 구동하는 대변위 탄성힌지 메커니즘에 의한 선형 구동기를 제안하고, 3대의 대변위 선형 구동기를 120° 간격으로 원형으로 배치하여 3점 지지형 면의 머니플레이션을 구현하였다.

설계에 의해 와이어 방전가공으로 탄성힌지 메커니즘을 가공한 후 미동 XY 스테이지 및 면의 머니플레이터를 제작하였다. 실험으로부터 미동 스테이지는 70 μm의 변위와 9 nm의 분해능이 도달되었다. 또한 선형 구동기는 300 μm의 작업 영역과 200 nm의 분해능을 갖는다. 선형 구동기를 이용한 3점지지 면의 머니플레이터가 개발되었고,  $0.6 \times 10^{-3}$ °의 면의 운동용 회전 분해능을 얻었다. 개발된 미세 머니플레이션 시스템의 요구사항은 미동 스테이지에서 50 μm 이상의 변위 및 50 nm 이하의 분해능과 면의 머니플레이터용 선형 구동기에서 300 μm의 변위와 500 nm의 분해능을 충족한다. 따라서 개발된 미세부품 조작용 초정밀 머니플레이션 시스템은 미세 부품의 초정밀 위치결정 및 미세 조작에 응용 가능하다.

**참고문헌**

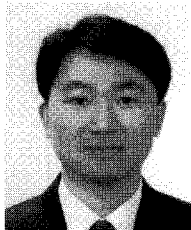
[1] K.-B. Choi and D. H. Kim, "A Monolithic parallel linear compliant mechanism for two axes ultraprecision linear motion," *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, no. 6, pp. 0651061-0651067, 2006.  
[2] D. Zhang, C. Chang, T. Ono, and M. Esashi "A piezodriven XY-microstage for multiprobe nanorecording," *Sensors and*

- Actuators A: Physical*, vol. 108. no. 1-3, pp. 230-133, 2003.
- [3] Y. Tian, B. Shrinzadeh, and D. Zhang, "A flexure-based five-bar mechanism for micro/nano manipulation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 153, no. 1, pp. 96-104, 2009.
- [4] D. Kang, K. Kim, D. Kim, J. Shim, D.-G. Gweon, and J. Jeong, "Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range," *Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 562-570, 2009.
- [5] M. N. M. Zubir, B. Shirinzadeh, and Y. Tian, "Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 150, no. 2, pp. 257-266, 2009.



### 최기봉

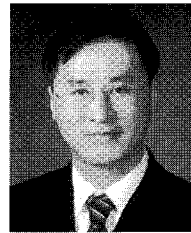
1963년 3월 31일생. 1985년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 1988년 KAIST 생산공학과(공학석사). 1998년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2001년~현재 한국기계연구원 책임연구원. 관심분야는 압전소자 응용 초정밀 메커니즘 설계 및 제어, 탄성힌지 메커니즘 개발, 나노임프린트 장비 기술.



### 김기홍

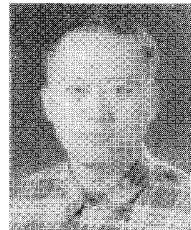
1970년 11월 16일생. 1992년 KAIST 정밀공학과(공학사). 1995년 KAIST 생산공학과(공학석사). 2000년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2003년~현재 한국기계연구원 선임연구원. 관심분야는 초정밀 측정, 나노임프린트 공정/장비 기술.

- [6] S. T. Smith, *Flexures: Elements of Elastic Mechanisms*, Gordon and Breach Science Pub., 2000.
- [7] N. Lobontiu, *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*, CRC Press LLC, 2003.
- [8] J. H. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Development of a piezoelectric actuator using a three-dimensional bridge-type mechanism," *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 5, pp. 2918-2924, 2006.
- [9] J. H. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Development and optimization of 3-D bridge-type hinge mechanisms," *Sensors and Actuators A*, vol. 116, pp. 530-538, 2004.
- [10] H.-W. Ma, S.-M. Yao, L.-Q. Wang, and Z. Zhong, "Analysis of the displacement amplification ratio of a bridge-type flexure hinge," *Sensors and Actuators A*, vol. 132, pp. 730-736, 2006.



### 이재중

1961년 5월 18일생. 1985년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 1987년 KAIST 생산공학과(공학석사). 1998년 KAIST 기계공학과(공학박사). 1987년~현재 한국기계연구원 책임연구원. 2005년~현재 과학기술연합대학원대학교 겸임교수. 관심분야는 나노 임프린트 공정/장비기술, 나노소자기술.



### 고국원

1970년 8월 8일생. 1992년 서울대학교 농업기계학과(공학사). 1994년 KAIST 정밀공학과(공학석사). 2001년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2002년~현재 선문대학교 정보통신공학과 조교수. 관심분야는 3D 측정, 영상처리.