

# 압전 액츄에이터를 이용한 Milli-Gripper의 동적 특성에 관한 연구

## A Study on Dynamic Characteristics of Milli-Gripper using Piezoelectric Actuator

곽동기<sup>†</sup>·이혜진\*·황재혁\*\*·이낙규\*·배재성\*\*

Dong-Gi Kwag, Hye-Jin Lee, Jai-Hyuk Hwang, Nak-Kyu Lee and Jae-Sung Bae

**Key Words** : Milli-gripper(밀리 그리퍼) ; PZT Actuator(압전 액츄에이터) ; Dynamic characteristics(동특성) ; Vibration test(진동실험) ; Experimental modal analysis (실험적 모드해석법)

### ABSTRACT

In this paper, a design of milli-gripper using piezoelectric actuator and flexible hinge structure has been suggested, and the dynamic characteristics of the milli-gripper has been analysed and improved. The milli-gripper consists of the operating and amplifier parts, and the performance of the gripper be heavily influenced by base excitation disturbances. The dynamic characteristics of milli-gripper has been measured by the FRF based on experimental modal analysis. It has been found by a series of experiments that the performance of the milli gripper using PID control is made a remarkable improvement in terms of gripping forces.

### 1. 서론

21세기는 반도체, 초정밀 가공, 정보기기 분야의 발달로 인하여 서브마이크론 크기의 제품을 요구하게 되었다. 이와 같은 경향은 초미세 광·열 및 기계부품의 핵심부품으로 적용되고 있으며, 최근 관련 제품들의 소형화, 저소비 전력화 추세에 맞추어 경량화, 소형화, 고기능화 되고 있다. 그 결과 기존의 기계적 장치는 만들고자 하는 제품에 비해 수 미터의 크기로 효율적이지 못하며, 그에 따른 물체를 파지하고 이동하기 위한 Gripper의 크기 역시 이동하고자 하는 대상물에 비해서 상당히 큰 기계적 장치이다.

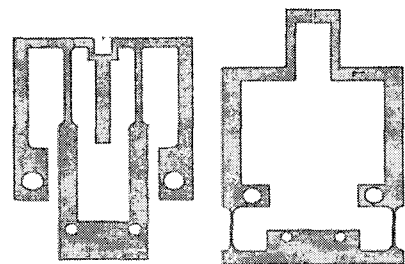
특히 마이크로 부품(MEMS) 조립 및 마이크로 인장시험기와 같은 응용분야에서는 센싱 및 조작의 중요성이 부각되고 있다. 정밀하고 신뢰성이 높은 조작을 위해서는 피드백 감지 기능을 하는 정밀한 Milli-Gripper의 필요성이 제기된다. 최근에 마이크로 가공기술의 발달과 함께 다양한 종류의 그리퍼에 관한 연구사례들이 발표되었는데, 상하이 대학의 Huibao Chen 과 Ping Sun은 새로운 타입의 Two-layer Milli-gripper를 제안하였다. 기존의 그리퍼는

대부분 일체형으로 구동기와 그리퍼가 같은 축 상에 존재한다. 그러나 Huibao Chen 과 Ping Sun은 구동축과 그리퍼를 분리시켜 각각을 힌지구조물로 설계하여 압전 액츄에이터의 제한된 출력범위를 극복하였다.

본 논문은 Two-layer Milli-gripper를 좀 더 발전시킨 설계 및 제작을 하였으며, 밀리그리퍼의 이동이 가능하도록 스텝모터를 장착 하였다. 앞선 연구사례와 다른 특징은 첫째, torsion hinge를 사용하여 layer간의 힘 전달이 가능하게 하였다. 둘째, 스텝모터로 인한 바닥 가진 및 피에조 액츄에이터에 의해 load가 가해졌을 때 그리퍼의 동적특성을 분석하기 위해서 스트레인 게이지를 부착하여 센싱이 가능하게 하였다.

### 2. Milli Gripper 설계 및 실험장치

#### 2.1 설계 및 해석



(a) Amplifier part (b) Operating part  
Fig. 1 Milli-Gripper의 Cad Model

<sup>†</sup> 책임저자 ; 정회원, 한국항공대학교 기계공학부  
E-mail : redsky@hau.ac.kr  
Tel : (02)300-0109, Fax : (02)3158-2191

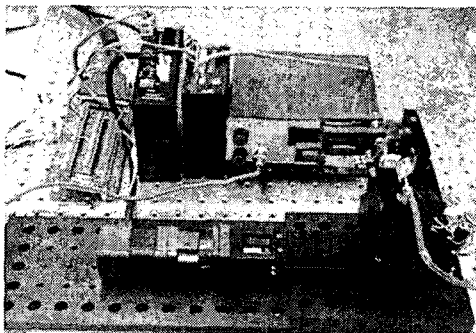
\* 한국생산기술연구원

\*\* 정회원, 한국항공대학교 기계공학부

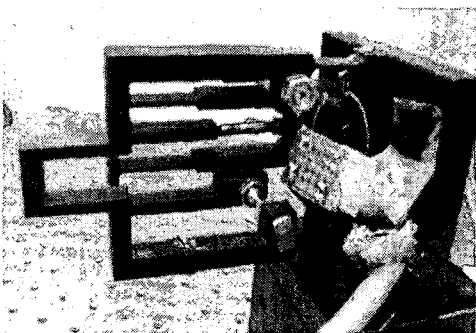
Fig. 1은 본 연구에서 제작한 Cad Model을 나타낸다. 밀리그리퍼는 크게 두 개의 파트로 구성되어 있으며, Amplifier Part는 PZT Actuator에 의해 발생된 선형추력을 기계적으로 탄성힌지 매커니즘을 통해 torsion hinge에 힘을 전달한다.

Operating Part는 증폭된 변위를 지렛대의 원리 (lever mechanism)를 통해서 2차 증폭을 한다. 본 연구에서는 유한요소해석(FEM) 및 가공정도를 고려하여 밀리그리퍼의 재질을 Al60 선정 하였고 기계적으로 큰 변형에도 회복이 잘 이뤄지며, 반복적인 큰 응력(stress)에도 영구적인 변형이 작도록 설계 하였다. 밀리그리퍼의 초기 간격은  $500\mu\text{m}$ 이며 PZT actuator( $20\mu\text{m}/150\text{V}$ )의 초기 증폭량은 힌지 구조물에 의해 9.5배 증폭이 된다. 센싱을 하기 위해서 FEM 결과로부터 strain이 선형적으로 걸리는 힌지에 strain gage( $120\Omega$ )를 부착하여 half bridge를 구성하였다.

## 2.2 실험장치



(a) Experimental setup



(b) Milli-Gripper using Piezo actuator

Fig.2 Schematic of experimental system

Fig. 2는 그리퍼를 이송 및 제어하기 위한 실험시스템을 나타낸다. 상용프로그램을 이용하여 DC Voltage 0~5V의 전압을 출력하면 Analog Amplifiers에 의해서 0~150V가 출력이 된다. 이

전압이 그리퍼에 장착되어 있는 PZT에 공급되어 전압에 비례하여 밀리그리퍼가 작동하게 된다. 입력 전압에 따른 밀리그리퍼의 gripping 위치는 실험을 통해서 얻은 strain data와 cam scope를 비교함으로써 알 수 있다. 밀리그리퍼의 정밀 이송을 위해 감속기(100:1)가 달린 스텝모터를 장착 했으며, 바닥가진이 밀리그리퍼 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 실시간으로 Data를 받고 피드백을 수행하였다.

## 3. Milli-Gripper의 동적 특성 파악

### 3.1 센서 위치에 따른 동특성 실험

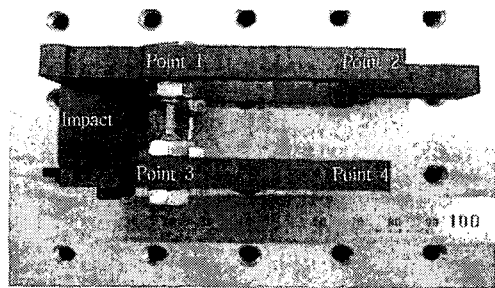


Fig. 3 Impact hammer and sensing positions

계의 동적 거동을 알기 위해서는 특정한 주파수에서 계의 응답특성을 찾아내야 한다. 본 연구에서는 Impact 위치를 고정시키고, 가속도계의 위치를 변화시키면서 실험 하였다. Fig.3은 Impact hammer의 충격 위치 및 가속도 센서의 부착위치를 나타낸다.

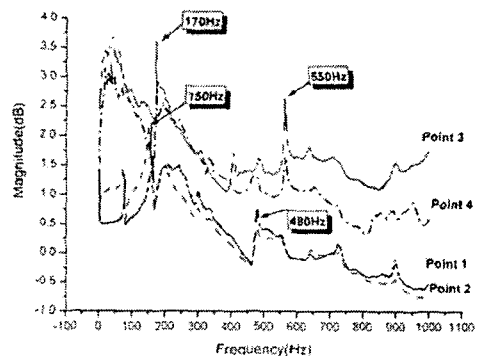


Fig. 4 FRF Data for 4-points

Fig. 4는 고정된 위치의 충격해머 충격력에 대해 4-point 가속도계에서 얻은 실험 결과를 ME'scope를 통하여 얻은 주파수 응답함수(FRF) 응답을 나타내고 있다. 같은 축 상에 있는 Point 1,2

와 Point3,4는 Peak 점이 동일하게 나타나고, impact 지점에서 가까운 point1,3는 point2,4에 비해 진폭의 크기가 크다.

Table 1 Comparison of Natural Freq.

Mode	Method	Simulation (FEM)	Experiment
1st		162Hz	152Hz
2nd		395Hz	510Hz

Table 1은 FEM 해석프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 1차 모드는 해석결과와 비슷하지만 2차 모드는 상당한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 일체형이 아닌 밀리그리퍼는 나사에 의해 3개의 Part가 체결된 강체 구조물이다. 나사 및 torsion hinge의 체결 부위가 시뮬레이션의 경계조건과 상당한 차이가 있기 때문에 2차 모드는 22%의 오차를 보이고 있다. FRF Data로부터 실험적 모드해석(experimental modal analysis)을 통해서 얻은 전달함수는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{0.0583s^2 + 2.798s + 1408.5}$$

실험적으로 구한 전달함수를 검증하기 위해서 임팩트 햄머를 이용하여 밀리그리퍼에 임펄스를 가했을 때의 응답과, 햄머를 통해 가해진 임펄스를 입력으로 하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 이와 같은 방법으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 새로운 파라미터를 구하였다.

$$H(s) = \frac{1}{0.0583s^2 + 0.2798s + 2508.5}$$

Fig. 5는 임팩트 햄머를 이용하여 얻은 신호를 이용하여 얻은 입력모델신호이다. 이 신호와 새롭게 구한 전달함수를 이용하면 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다.

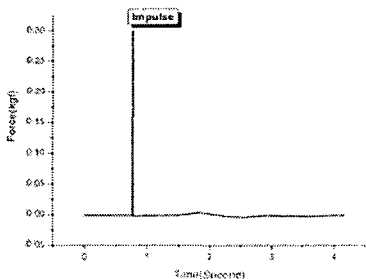
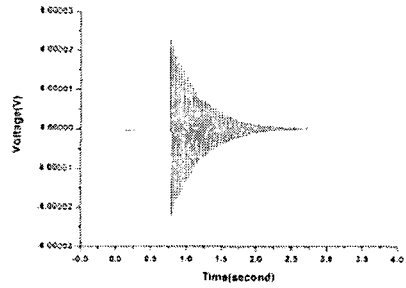
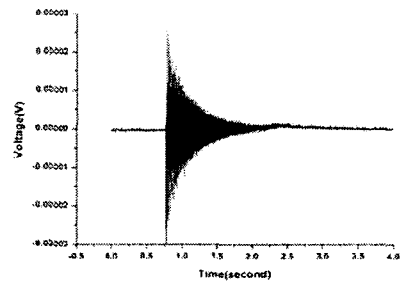


Fig. 5 Impulse of impact hammer



(a) Simulation Result



(b) Experiment Result

Fig.6 Comparison of simulation result with experiment result

### 3.2 PID 기법을 이용한 Milli-gripper의 진동제어

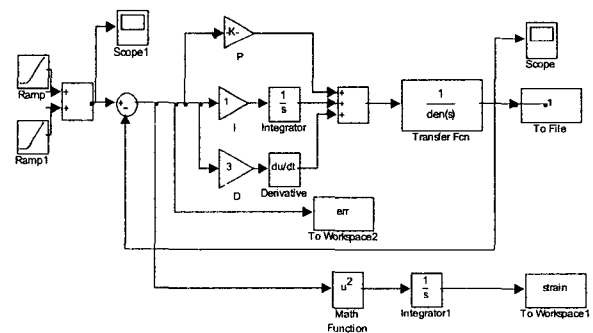
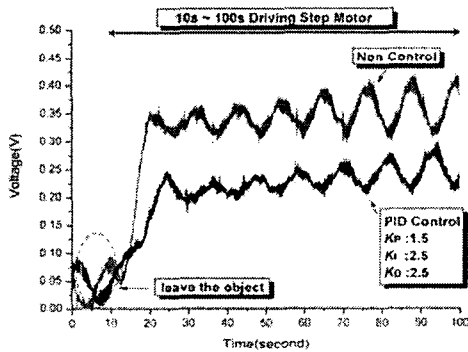


Fig. 7 System modeling by Matlab

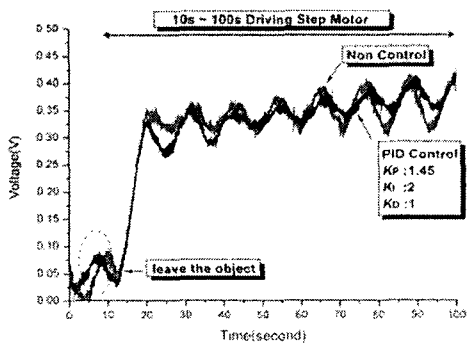
밀리그리퍼로 부품을 잡고 이동하고자 하는 곳으로 이송 할 경우 이동장치로부터 외란이 발생하게 된다. 이러한 외란은 gripping force 및 gripping 위치에 영향 미치기 때문에, 밀리그리퍼 성능 저하를 가져온다. 본 연구에서는 스텝모터로부터 오는 바닥가진을 제어하기 위해서 Zigler-nichols 기법을 이용하여 PID 계수를 정하였으며, 이 계수들은 실험을 통하여 최적의 계수로 선정하였다.

상용프로그램을 이용하여 Fig. 7의 Matlab simulink와 연동 하였으며, 스텝모터에 1 KHz의 펄스를 주고, 작은 물체를 파지한 상태에서 시험을

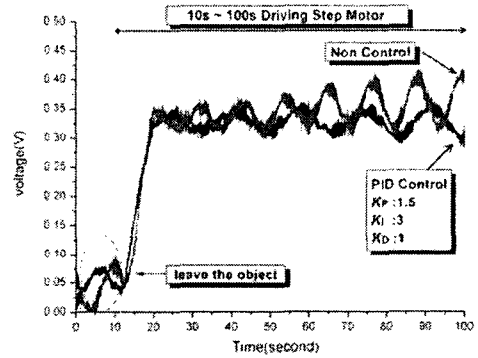
수행하였다. 초기 0~10초간은 물체를 그리퍼 끝단에 물리고, 10~20초간은 피에조 액추에이터에 물체 크기에 맞는 전압을 인가하여 gripping하고, 그 이후 부터는 일정한 voltage를 유지한다. 스텝모터는 피에조 액추에이터에 input voltage가 들어 가는 순간부터 이송을 시작한다. Fig. 8은 밀리그리퍼에 PID Control을 적용한 실험 결과를 나타낸다. 실험결과에서 제어하지 않은 상태에서 밀리그리퍼에 가해지는 외란은 일정하지만, 지속적인 외란을 받는 밀리그리퍼는 점점 큰 진폭으로 발산하고 있다. PID 기법을 적용하여 제어입력(control input)을 피에조 액추에이터에 인가하여, Zigler-nichols 기법을 이용하여 선정된 계수들을 실험을 통해 다시 한번 튜닝 하였다. Fig. 8(a)는 Matlab을 이용하여 구한 계수(Kp, Ki, Kd)의 응답을 나타내고 있는데, Ki, Kd 값이 크기 때문에 피드백 값이 목표값을 따라가지 못하는 현상이 발생 하였다. Fig. 8(b)은 Ki, Kd 값을 줄여서 어느 정도 목표값(0.33V)을 따라 가지만 시간이 지남에 따라서 진폭의 크기가 커지는 현상이 발생하였다. Fig. 8(c)는 시스템의 안정성을 높이기 위해서 Kp 값을 0.5증가 시켜 응답을 조금 빠르게 설정하고, Ki 값을 1증가 하여 적분 시간을 감소 시켜 피드백 값이 발산 하지 않고 유지 될 수 있도록 하였다.



(a) PID Control Gain(Kp:1.5, Ki:2.5,Kd:2.5)



(b) PID Control Gain(Kp:1.45, Ki:2,Kd:1)



(c) PID Control Gain(Kp:1.5, Ki:3,Kd:1)  
Fig. 8 Comparison of experiment results

#### 4. 결론

본 논문에서는 탄성복원력을 가진 유연성 힌지를 이용하여 설계 하였으며, FEM 해석결과를 바탕으로 재질을 선택하고 안정한 밀리그리퍼를 제작 하였다. 밀리그리퍼의 구동은 정밀도가 우수한 피에조 액추에이터를 이용 하였으며, 선형 스트레인이 작용하는 힌지에 스트레인 게이지를 부착하여 센싱을 하였다. 실험적 모드해석법을 이용하여 구한 전달함수는 파라미터 수정을 통하여 시뮬레이션 결과와 실험결과가 거의 일치하였다. 물체를 잡고 이송시 스텝모터에 의해 발생하는 바닥가진 밀리그리퍼의 성능을 저하 시킨다. 밀리그리퍼의 성능을 개선시키기 위해서 PID Control 기법을 적용하였으며, 그 결과 밀리그리퍼에 작용하는 진동에 대한 영향을 줄일 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 표준화기술개발사업중 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 '나노 및 마이크로 막형 소재의 마이크로 인장 특성 표준 시험평가 기술 개발'과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) Wei Xu and Tim King 1996, "Flexure hinges for piezo-actuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations." Pre. Eng., 19:4-10,
- (2) Tim King and Wei Xu 1996, "The design and characteristics of piezomotors using flexure-hinged

displacement amplifiers." Robotics and Autonomous Systems 19 189-197.

(3) 정규원, 정영빈 2004, "PZT 구동기를 이용한 초정밀 마이크로 스테이지 개발" Journal of Industrial Science and Technology Institute Vol. 18, No. 1 pp27-33, July

(4) Z.W.Jiang and S.Chonan "Development of Soft-Handling Gripper Driven by Piezoceramic Stack" Dep. of Mechatronics and Pre. Eng, Tohoku Univ. Sendai, Miyagi 980-77, Japan.

(5) 김희국, 윤성식, 박주영, 김태룡 1995, "파지공구 메카니즘의 기구학적 최적설계" 대한기계학회 1995년 춘계학술대회논문집(1) pp. 925-930.

(6) Stuart T. Smith, Vivek G. Badami, Jami S. Dale, and Ying Xu 1997, "Elliptical flexure hinges" Rev. Sci. Instrum. 68(3), March

(7) J. M. Paros and L. Weisbord 1965, "How to design Flexure Hinge" Machine Design 37, 151-156.

(8) Huibao Chen, Ping Sun 1996, "The Design of Two-layer Flexible Hinge Milli-gripper" 7th International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE.

(10) 양희철, 이승섭, 박범석, 신호준, 한창수 "초정밀 메뉴플레이션을 위한 Flexure hinge 밀리그리퍼설계 및 제안에 관한 연구" 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(대한기계학회편).