

## 나노스탬프 구동용 중공형 압전액추에이터 기본특성에 관한 연구<sup>§</sup>

박중호\*<sup>†</sup> · 이후승\* · 이재종\*\* · 윤소남\* · 함영복\* · 장성철\*\*\*

\* 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부, \*\* 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부

\*\*\* 한국폴리텍항공대학 항공메카트로닉스과

### A Study on Basic Characteristics of Hollow Piezoelectric Actuator for Driving Nanoscale Stamp

Jung-Ho Park\*<sup>†</sup>, Hu-Seung Lee\*, Jae-Jong Lee\*\*, So-Nam Yun\*, Young-Bog Ham\* and Sung-Cheol Jang\*\*\*

\* Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials.,

\*\* Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials.,

\*\*\* Dept. of Aviation Mechatronics, Korea Aviation Polytechnic.

(Received December 16, 2010 ; Revised July 15, 2011 ; Accepted July 18, 2011)

**Key Words:** Piezoelectric Actuator(압전액추에이터), Nanoimprint Lithography(나노임프린트 리소그래피), Hollow Actuator(중공형 액추에이터), Nanoscale Stamp(나노스탬프)

**초록:** 최근, MEMS/NEMS 기술을 이용하여 기능성 나노 구조물을 제작하기 위한 공정기술 중에, 마스터 스탬프에 형성된 나노패턴을 웨이퍼 등에 복제할 수 있는 나노임프린트 리소그래피 기술이 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 기존 멀티헤드방식 나노임프린팅 장비에서 사용되던 전동모터를 대신하여 플렉서 메커니즘과 결합된 나노스탬프를 구동하기 위한 사각 형상의 중공형 압전액추에이터를 설계, 제작하였으며, 제조공정이 다른 각각의 시제품의 변위, 발생력 및 응답특성에 관한 검토를 수행한다. 또한, 압전 액추에이터의 변위제어에 대한 제어수법을 간단히 소개하였으며, 제작한 프로토타입의 PI제어기에 의한 변위 제어결과를 소개한다.

**Abstract:** Nanoimprint lithography has been actively investigated. This method can replicate a nanopatterned master stamp onto a thin polymer film on a silicon substrate and so on. In this study, a square-shaped hollow piezoelectric actuator is presented, which is newly developed. This actuator is used for driving a nanoscale stamp in nanoimprint lithography instead of a conventional electric motor. The fabricated prototype actuator has 95 layers and side lengths of 23 mm and 18 mm for the outer and inner squares, respectively. By adopting a novel process instead of the conventional forming process for fabricating a one-layer actuator, the one-layer is composed of four rectangular segments produced by sawing a ceramic film with a thickness of 0.3 mm. The basic characteristics on displacement and generation force of the fabricated prototype actuator are experimentally investigated. Furthermore, the displacement characteristics obtained by using a PI controller are tested and discussed.

## 1. 서 론

최근, MEMS/NEMS 기술을 이용하여 기능성 나노 구조물을 제작하기 위한 공정기술 중에, 기존의 광학을 이용한 패턴전사 공정의 회절한계를

극복하기 위하여 마스터스탬프에 형성된 나노패턴을 웨이퍼 등에 복제할 수 있는 나노임프린팅 리소그래피 기술이 활발히 연구되고 있다.<sup>(1~7)</sup> 한국기계연구원에서는 나노메카트로닉스 기술개발사업(21세기프린터 연구개발사업)의 지원으로 50 nm 이하의 패턴성형이 가능한 멀티헤드방식의 나노임프린팅 장비(ANT-4)를 개발하였다. 멀티헤드방식의 나노임프린팅 장비는 한번의 작업으로 대면적의 임프린팅이 가능하며 스탬프와 웨

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [jhpark@kimm.re.kr](mailto:jhpark@kimm.re.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

이퍼사이의 기하학적인 틀어짐을 보정할 수 있는 플렉서 메커니즘(Flexure mechanism)을 가지고 있고, 스탬프와 웨이퍼의 변형에 따른 문제를 해결할 수 있는 균일접촉 시스템을 가지고 있는 것이 특징이다.

나노임프린팅 방식에 있어서는 비교적 고온(140~180°C), 고압(1~3MPa)의 공정조건이 필요한 열경화 방식보다는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 상온 및 0.2MPa 이하의 저압에서 공정이 가능한 자외선(UV) 경화 방식을 이용한 나노임프린팅 장비가 활발히 연구되고 있다. 이러한 장비의 고기능화 및 패턴전사 성능 향상을 위해서는, 기존의 전동모터를 대체하여 한정된 설치 공간 내에서 수십  $\mu\text{m}$ 의 스탬프 변위를 독립적으로 제어할 수 있는 초정밀, 초소형 액추에이터 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 플렉서 메커니즘과 결합된 나노스탬프를 구동하기 위한 사각 형상의 중공형 압전액추에이터를 설계, 제작하였으며, 제조공정이 다른 각각의 시제품의 변위, 발생력 및 응답특성에 관한 검토를 수행한다. 또한, 압전 액추에이터의 변위제어에 대한 제어수법을 간단히 소개하였으며, 제작한 프로토타입의 PI제어기에 의한 변위 제어결과를 소개한다.

## 2. 제작 및 설계사양

### 2.1 압전액추에이터의 제작

멀티헤드방식의 나노임프린팅 장비에 접목하여 나노스탬프를 구동시키기 위해서는 장치특성상

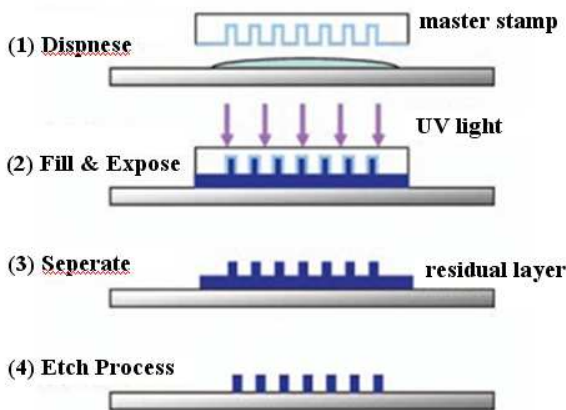


Fig. 1 Schematics of UV nanoimprint lithography

사각 형상의 중공형 압전액추에이터의 개발이 요구된다. 얇은 압전세라믹을 수 십층 적층하여 제작한 압전액추에이터는 비록 변위는 작을지라도 분해능(nm급)이 우수하고 큰 발생력 및 낮은 소비전력과 같은 장점들 때문에 나노 스테이지의 위치제어, 초소형 유체디바이스 구동 등 첨단 산업 응용분야에서 폭 넓게 응용되고 있다. 그러나 본 연구에서 거론하는 사각 형상의 중공형 액추에이터의 개발 사례는 전 세계적으로 찾아보기 어렵다.

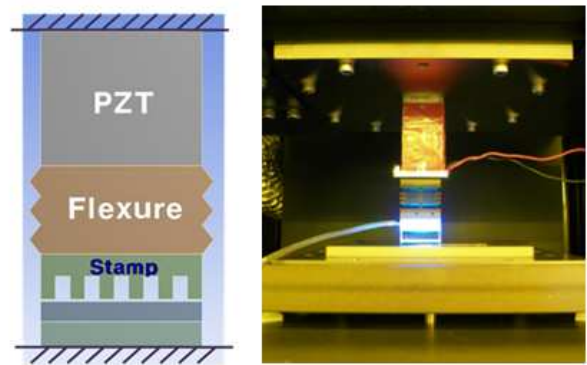
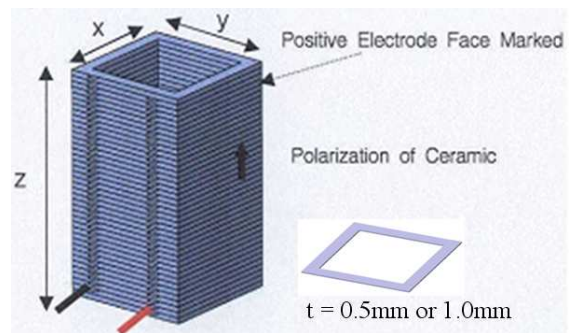
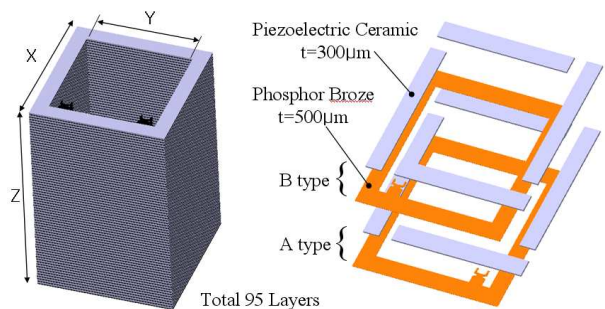


Fig. 2 Driving method for nanoscale stamp



(a) Actuator with forming process



(b) Actuator with segments of piezoelectric thin film

Fig. 3 Fabricated hollow piezoelectric actuator

**Table 1** Dimension and general characteristics of the fabricated hollow piezoelectric actuator

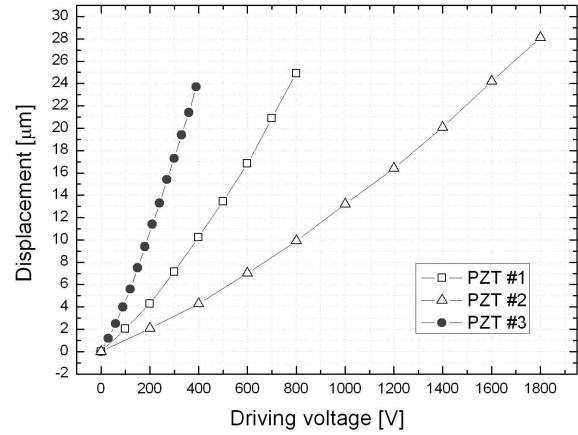
Item NO	Dimension	C	Fr	Ceramic Layer t(mm)
	z (mm)	(nf)	(kHz)	
PZT #1	39.12	386	57.2	0.5
PZT #2	39.35	107	29.7	1.0
PZT #3	34.5±0.5	1,294	53.3	0.3

**Table 2** Design specification of the actuator for driving nanoimprinting equipment

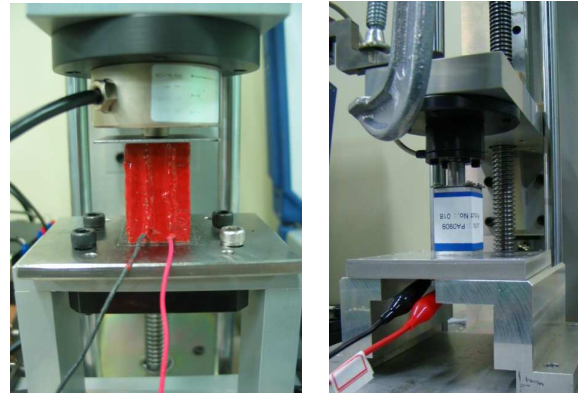
Actuator shape	Hollowed and Square type
Size of actuator	Outside: 23 mm×23 mm
	Inside: 18 mm×18 mm
	Height: More than 40 mm
Generated displacement	More than 20μm
Generated force	More than 10 N
Response time	Less than 1 min

Fig. 3(a)와 (b)는 본 연구를 통해서 개발된 중공형 압전액추에이터의 개념도를 나타낸다. Fig. 3(a)에 나타낸 액추에이터의 제작에는 전처리를 통해서 얻어진 압전 파우더를 금형에 주입한 후, 일축 가압 프레스를 이용한 성형공정과 1200℃의 열처리, 스크린 프린팅법에 의한 은 페이스트의 전극처리, 분극공정을 거쳐서 얻어진 두께 0.5mm 내지는 1.0mm의 세라믹을 적층하는 공법이 사용되었다. 구동전압을 줄이고 액추에이터 변위를 설계 사양 (20 μm 이상)에 만족시키기 위해서는 세라믹 층을 얇게 제작할 필요가 있으나 상기 공정에서는 국내기술력의 한계로 세라믹 한 층의 두께를 0.5mm 이하로 제작하는 것은 어렵다. 또한, 소결과 적층공정에 있어서 변형되기 쉬워서 정확한 형상을 유지하기 어려운 문제점도 있다.

따라서, 본 연구에서는 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 새로운 공정을 적용하였다. 가압 프레스를 이용한 성형공정 대신에 필름형상의 압전박막을 적층함으로써 0.3mm 두께의 세라믹 층을 제작하고 다이싱을 통해서 장방형으로 형성된 4조각의 압전체를 동판위에 접착시키는 방식이다. 그림에



**Fig. 4** Displacement characteristics of the fabricated actuator with forming process



(a) PZT #1 (b) PZT #3

**Fig. 5** Experimental apparatus for driving voltage-generated force characteristics

나타낸 바와 같이 압전체의 면과 정렬방향 등이 반대가 되도록 A-type과 B-type을 겹쳐서 적층함으로써 원하는 액추에이터 형상을 얻을 수 있었다.

Table 1에 제작된 중공형 압전액추에이터의 주요 제원과 측정된 전기적 특성 등을 나타낸다. PZT #1과 #2는 가압프레스를 이용해 제작된 액추에이터이고, PZT #3은 상기 기술한 신 공정을 이용한 액추에이터이다. 각 액추에이터의 x는 23mm, y는 18mm로 동일하다. 그러나 액추에이터의 적층방향 길이에 있어서는 PZT #3이 다른 액추에이터에 비해서 5mm 정도 짧게 제작되었다.

2.2 설계사양

나노임프린팅을 위한 액추에이터는 빠른 반응 속도 보다는 정확한 위치제어능력 및 그에 부합

하는 발생력을 요구하고 있으며, 형상에 있어서 사각형상의 중공형태를 가짐으로써 장비의 조립, 설치 및 배선에 있어서의 용이함을 필요로 한다. 이에 만족하는 설계사양을 Table 2에 표기하였으며 본 연구에서는 이 설계사양을 기준으로 이를 만족하기 위한 액추에이터를 개발하였다.

### 3장 실험 및 결과

#### 3.1 변위 및 발생력

제작된 중공형 압전액추에이터에 대한 최대변위 및 최대발생력 등에 대한 실험을 수행하였다. 변위센서는 비접촉으로 고정도 측정이 가능한 레이저 변위계(KEYENCE LC2430, 분해능 0.02 μm, 샘플링주파수 50kHz)를 사용하였다. Fig. 3에 나타낸 세 가지 타입의 액추에이터에 대해 실험을 수행하였으며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 최대변위의 경우 PZT #1은 800V의 전압인가 시 25 μm의 변위가, PZT #2는 1800V의 전압인가 시 28 μm의 변위가, 그리고 PZT #3는 390V의 전압인가 시 23.6 μm의 변위가 얻어지는 것을 확인하였다. 내전압의 한계상 PZT #1의 경우는 PZT #2에 비해서 절반의 전압만 인가하였다. 구동전압을 저감시키기 위해서 본 연구에서 제시한 제작공정 개선의 타당성을 확인할 수 있었다.

다른 방식의 제작공정을 이용한 중공형 압전액추에이터의 발생력 특성에 대해서 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 실험을 수행하였다. 변위를 구속시킨 상태에서 구동전압 대비 로드셀(CBFS-30, 0.9818mV/V)을 통해서 얻어진 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 300V의 전압인가 시 PZT #1과 PZT #3은 각각 4N과 16.4N의 최대 발생력이 얻어졌다.

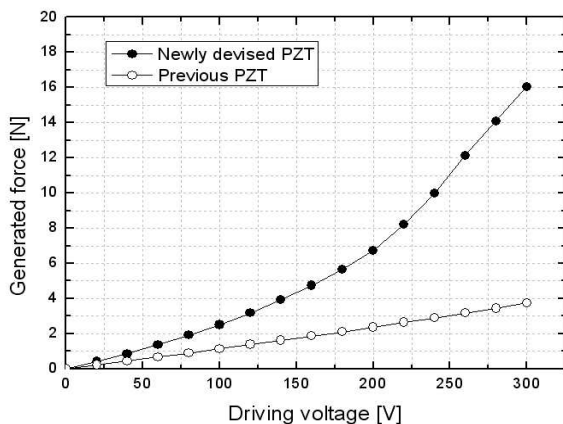


Fig. 6 Generated force characteristics

멀티헤드방식의 나노임프린팅 장비에 있어서 패턴을 웨이퍼 등에 전사시키기 위한 최소한의 힘은 아직 정확히 측정되지는 않았지만 약 10N 이하의 힘이 소요될 것으로 추측된다. Fig. 7에는 액추에이터의 입력전압 대비 출력 변위 히스테리시스 특성을 나타내었다. 실험결과, 약 25%의 히스테리시스 특성이 얻어졌으며 이는 차후 PI제어나 역 히스테리시스 제어 등의 방법을 통하여 개선이 필요한 사항이라 할 수 있다. 상기 실험 결과로부터, 실제 구동에 있어서, 동일전압에서 다른 두 개의 액추에이터 대비 우수한 변위특성과 발생력을 가지는 PZT #3이 나노임프린팅 장비용 액추에이터의 설계사양 및 일반적인 특성에 있어서 우수하다고 판단하고 이에 대한 제어특성을 이어서 수행하였다.

#### 3.2 PI 제어

위에서 언급한 바와 같이, 이전 연구에서 수행한 변위특성을 토대로 PI 제어를 수행하였다. 액추에이터의 제어를 위한 블록선도를 Fig. 8에 표시하였고, 시스템에 사용된 장비의 분해능 및 샘플링 타임을 Table 3에 나타내었다. Table 3에 보

Table 3 Measurement equipments specification

Model	Sampling time	Resolution
PXI-6221 (NI)	4 μ s/S	16bit
C23-B (LION)	60 μ s/S	5nm

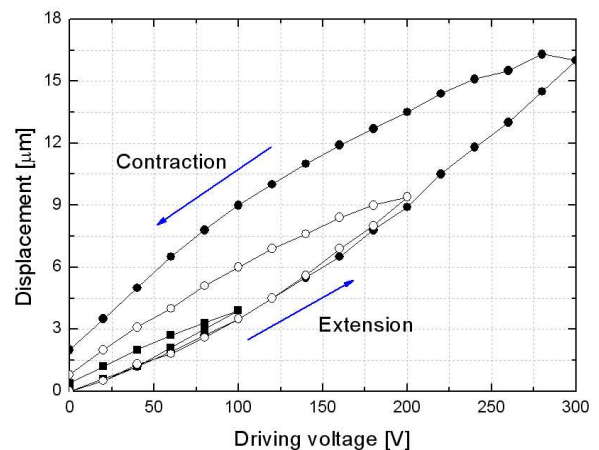


Fig. 7 Hysteresis characteristics of the actuator

이는 바와 같이, 전체 시스템의 처리속도는 가장 느린 속도인 센서의 분해능 15kS/s (=약 60  $\mu$ s/S)에 맞춰서 작동하였다. 실제로 실험에서는 약 80  $\mu$ s/S의 속도로 제어가 되었으며, Real-time 모듈을 사용하여 제어하였기 때문에 버퍼에 따른 시간지연이 고려된 데이터를 수집할 수 있었다. 그러나 Fig. 9에 나타낸 것처럼 100V의 전압을 증폭기를 통하여 액추에이터에 인가 시, 응답시간이 약 15  $\mu$ s이고 오버슈트가 300%에 달하기 때문에 정확한 제어에 의한 안정적인 시스템을 구성하기가 힘들었다. 또한 Fig. 10과 같이 앰프에서의 100V 출력신호가 액추에이터에 인가될 때 액추에이터의 자체적인 캐패시턴스(1294nF)에 의해 역전압이 발생되면서 앰프의 출력신호가 왜곡되는 현상이 발생하였다.

이와 같은 현상을 보완하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 제어방법을 적용하였다. 오버슈트의 영향을 최소한으로 줄이기 위해 P-gain을 작게 하여 루프반복 시 나타나는 출력의 오버슈트를 작게 하였으며, I-gain을 조절을 통한 제어오차를 최소한으로 하는 방법을 사용하였다. 이는 이번에 개발한 나노임프린팅 장치에 사용되는 액추에이터에 요구되는 반응속도는 1min 이내이므로 응답성이 중요하지 않다는 결론을 내렸고, 이에 따라 위와 같이 예비적으로 실험한 것이며, 차후 5차 시스템으로의 근사화 및 그에 따른 정확한 PI-gain값을 도출함으로써 정밀한 제어가 필요하다고 할 수 있다.

제어결과, Fig. 11에 나타나듯이, P-gain: 0.05, I-gain: 0.001에서 요구변위를 5  $\mu$ m로 주었을 때와 2.5  $\mu$ m로 주었을 때 약 5s의 정착시간과 300nm이하의 정상상태 오차 값을 가지는 제어 성능이 구현되었다. 정상상태에서 나타나는 오차 값은 센서의 노이즈에 의한 값으로 판단할 수 있

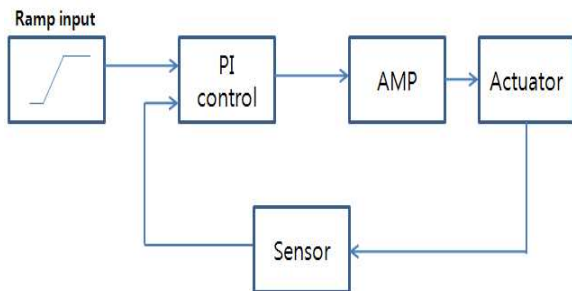


Fig. 8 Block diagram for PI control

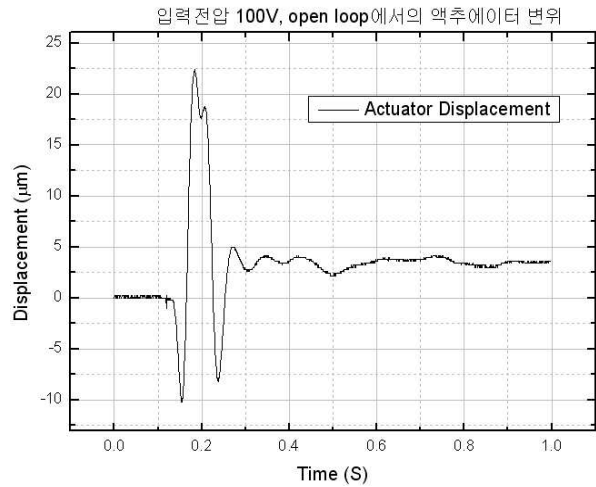


Fig. 9 Displacement waveform of the actuator at 100V input voltage

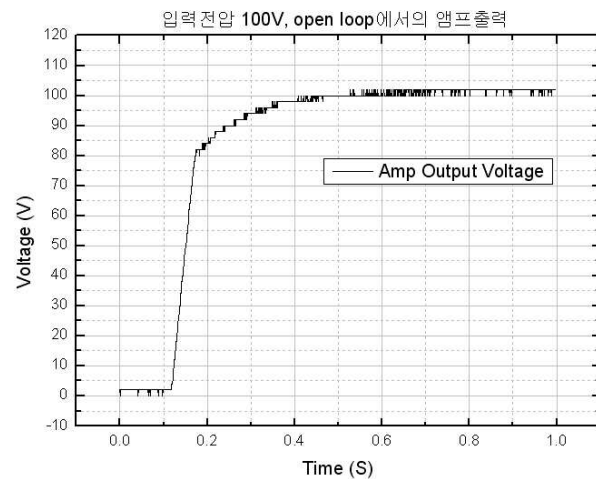


Fig. 10 Output voltage of the amplifier at 100V input voltage

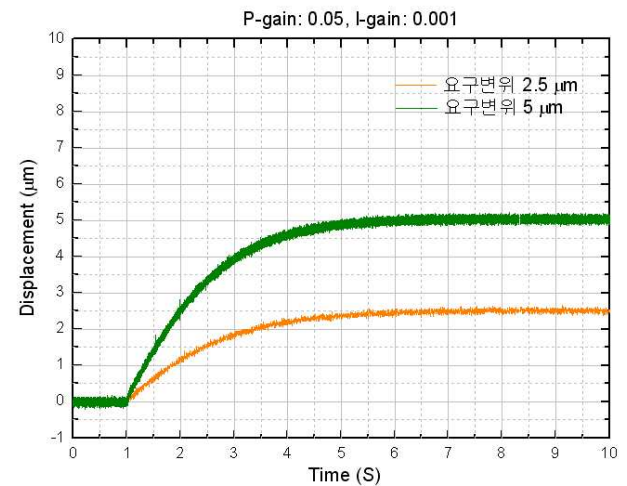


Fig. 11 Control of the displacements of the actuator using PI control method

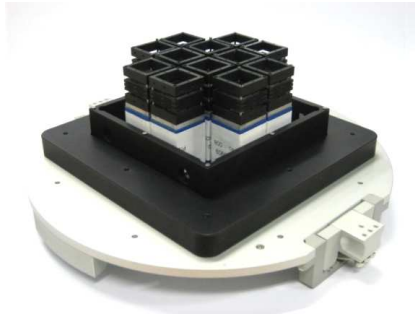


Fig. 12 Driving module using multiple actuators

으며, 전기적 노이즈의 제거를 수행한 후 좀 더 정밀한 제어성능의 확인을 요하는 부분이라 할 수 있겠다. Fig. 12에는 타당성이 확인된 중공형 압전액추에이터를 멀티헤드방식 대면적 나노임프린트 장비에 다수 장착하여 스탬프의 독립구동이 가능하게 설계된 구동모듈을 나타낸다. 향후 본 모듈을 사용하여 나노임프린팅 장의 성능을 테스트 할 계획이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 멀티헤드방식의 나노임프린트 장비에서, 플렉서 메커니즘과 결합된 나노스탬프를 구동하기 위한 사각형상의 중공형 액추에이터를 개발하였고, 프로토타입의 변위, 발생력 및 응답성에 대한 특성을 검토하였다. 또한, 제작된 프로토타입의 시스템특성에 따라 최적의 제어 변수를 도출하였다. 그 결과, P-gain: 0.05, 그리고 I-gain: 0.001의 조건에서 요구변위  $5\mu\text{m}$ 와  $2.5\mu\text{m}$  입력 시, 약 5s의 정착시간과 300nm 이하의 오차가 발생하였으며, 차후 센서의 노이즈를 제거한 후 5차 시스템으로의 동정을 거쳐 PI-gain의 최적값을 찾아내고, 이를 제어하는 과정이 필요하다고 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부 21세기프론티어연구개발사업(나노메카트로닉스기술개발사업)인 “다층

나노임프린팅 장비 핵심원천기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, J.-J., Park, S.-Y., Choi, K.-B. and Kim, G.-H., 2008, "Nano-Scale Patterning Using the Roll Typed UV-Nanoimprint Lithography Tool," *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, No. 5-6, pp. 861~865.
- (2) Ishii, Y. and Taniguchi, J., 2007, "Fabrication of Three-Dimensional Nanoimprint Mold Using Inorganic Resin in Low Accelerating Voltage Electron Beam Lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, pp. 912~915.
- (3) Park, S.-Y., Choi, K.-B., Kim, G.-H. and Lee, J.-J., 2009, "Nanoscale Patterning with the Double-Layered Soft Cylindrical Stamps by Means of UV-Nanoimprint Lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, No. 4, pp. 604~607.
- (4) Hsueh, C.-H., et al, 2006, "Analyses of Mechanical Failure in Nanoimprint Processes," *Materials Science and Engineering A* 433, pp. 316~322.
- (5) Jang, H. S., Kim, G. H., Lee, J. J. and Choi, K. B., 2010, "Eliminating the Undercut Phenomenon in Interference Lithography for the Fabrication of Nano-Imprint Lithography Stamp," *Current Applied Physics*, Vol. 10, pp. 1436~1441.
- (6) Park, J.-H., Lee, H.-S., Lee, J.-J., Choi, K.-B., Yun, S.-N., Ham, Y.-B. and Wang, Y.-S., 2010, "Basic Characteristics of Hollow Piezoelectric Actuator for Positioning Nanoscale Stamp," *Proceedings of ACTUATOR 2010*, pp. 597~600.
- (7) Park, S.-Y., Kim, G.-H., Choi, K.-B. and Lee, J.-J., 2010, "Fabrication of a 3D Stamp with the Micro- and Nano-Scale Patterns Through Combined NIL and Optical Lithography Processes," *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, pp. 968~971.