

기계적 비선형 변조기를 이용한 디지털 구동의 안정화와 나노 구동정도 구현을 위한 디지털 마이크로액추에이터

이원철* · 진영현** · 조영호†

(2004년 8월 12일 접수, 2004년 10월 25일 심사완료)

Mechanically Modulated Nonlinear Digital Microactuators for Purified Digital Stroke and Nano-Precision Actuation

Won Chul Lee, Young-Hyun Jin and Young-Ho Cho

Key Words : Digital Actuator(디지털 구동기), Mechanical Modulator(기계적 변조기), Nonlinear Modulation(비선형 변조)

Abstract

This paper presents a nonlinearly modulated digital actuator (NMDA) for producing nano-precision digital stroke. The NMDA, composed of a digital microactuator and a nonlinear micromechanical modulator, purifies the stroke of the digital actuator in order to generate the high-precision displacement output required for nano-positioning devices. The function and concept of the nonlinear micromechanical modulator are equivalent to those of the nonlinear electrical limiters. The linear and nonlinear modulators, having an identical input and output strokes of $15.2\mu\text{m}$ and $5.4\mu\text{m}$, are designed, fabricated and tested, respectively. The linear and nonlinear modulators are linked to identical digital actuators in order to compare the characteristics of the linearly modulated microactuator (LMDA) and NMDA. In addition, an identical linear modulator is attached to the output ports of LMDA and NMDA. The NMDA shows the repeatability of $12.3\pm 2.9\text{nm}$, superior to that of $27.8\pm 2.9\text{nm}$ achieved by LMDA. When the identical linear modulator is connected to LMDA and NMDA, the final modulated output from NMDA shows the repeatability of $10.3\pm 7.2\text{nm}$, superior to that of $15.7\pm 7.7\text{nm}$ from LMDA. We experimentally verify the displacement purifying capability of the nonlinear mechanical modulator, applicable to nano-precision positioning devices and systems.

1. 서 론

최근 광자 및 바이오 물질이 새로운 정보전달 매체⁽¹⁾로 주목을 받고 있다. 이러한 극미세 광 및 바이오 물질의 정밀한 조작이나 제어⁽²⁻⁴⁾를 위해서는 나노미터 정도의 구동기가 요구된다. 이에, 최근 디지털 구동의 기계적 변조^(5,6)를 이용한 고정도 구동장치가 제안되었다. 그러나 종래의 기계적 변조를 이용한 고정도 구동장치는 입력구동의

기계적 축소변조를 통해 입력구동의 오차가 최종 출력단에서 축소되긴 하지만 구동범위와 구동정도의 비(신호와 잡음의 비)는 일정하게 되며 결국 구동장치 전체의 정도는 단위 디지털 구동의 정도에 의해 제한된다. 따라서 ICP 등 MEMS 기술에 의해 제작된 디지털 구동기의 정도는 노광전사 오차 및 가공단면의 경사와 조도 등 제조공정오차에 의해 $0.1\mu\text{m}$ 수준 이하로 유지하기가 불가능하므로, MEMS 기술에 의한 구동기를 이용하여 나노구동 정도를 구현하는데 현실적으로 기술적 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 MEMS 기술에 의한 디지털 액추에이터의 구동 오차를 나노미터 급으로 감소시킬 수 있는 방법으로 기계적인 비선형 변조기를 제안하고 이를 이용하여 디지털 구동을 정제함으로써 제조공정 오차에 의한 구동오차를 제거함으로써 나노미터 정도의 구동 출력을 얻을

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오시스템학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

* 한국과학기술원 바이오시스템학과, 디지털나노구동연구단

** 한국과학기술원 기계공학과, 디지털나노구동연구단

수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안하는 비선형 변조 구동기(Fig. 1)는 단위 디지털 액추에이터와 비선형 기계적 변조기의 조합으로 구성되어 있다. 먼저 단위 디지털 액추에이터가 일정 구동을 발생시키면 비선형 기계적 변조기가 이를 변조 혹은 정류하여 고정도의 디지털 구동을 최종 출력하는 원리로 작동한다. Fig. 2 는 두 개의 탄성체-질량체 쌍으로 이루어진 기계적 변조기의 이론적 모델을 나타내고 있으며, Fig. 3 에서는 선형 및 비선형 변조기에서의 구동 입력과 구동 출력의 관계를 보여주는 변조 곡선을 각각 비교하였다. 먼저 Fig. 2 의 변조기가 두 개의 선형 탄성체로 구성된 선형 변조기의 경우, 변조곡선[Fig. 3(a)]이 선형인 관계로 구동 입력 오차의 절대적인 크기는 구동 출력단에서 감소시킬 수 있으나, 출력단에서의 구동 상대오차(구동오차와 구동거리의 비)를 감소시킬 수는 없다. 이것은 구동 입력과 구동 출력간의 비율이 구동 입력 오차와 구동 출력 오차의 비율과 일치하므로, 입력단과 출력단에서의 구동 상대오차가 상수로 유지되기 때문이다. 반면, Fig. 2 에서 하나의 비선형 탄성체(k_2)와 하나의 선형 탄성체(k_1)로 구성된 비선형 변조기의 경우에는, 비선형 변조곡선[Fig. 3(b)]의 특성을 이용하여 구동 출력단에서 오차의 절대적인 크기와 함께 구동 상대오차도 감소시킬 수 있다.

2. 이론적 해석 및 설계

이에 본 연구에서는 ㄷ자형 보를 선형 탄성체로, 양단지지보를 비선형 탄성체로 각각 이용하여, Fig. 4 와 Table 1 에 제시한 바와 같이 선형 변조기가 부착된 디지털 액추에이터(LMDA: Linearly Modulated Digital Actuator)와 비선형 변조기가 부착된 디지털 액추에이터(NMDA: Nonlinearly Modulated Digital Actuator)를 각각 설계하였다. 먼저 두 종류의 액추에이터 모두 기계적인 stopper 로 구동거리를 제한하여 공히 15.2 μ m 의 디지털 구동(x_{in})을 내도록 하였다. 이 디지털 구동은 기계적 변조기의 입력단(Fig. 2 의 m_1)에 공급되게 된다. 또한 본 연구에서는 Fig. 5 와 Table 1 에 제시한 바와 같이 LMDA 및 NMDA 에 동일한 선형 변조기가 부착된 한 쌍의 시편 또한 제작하였다. LMDA 및 NMDA 에 부착된 선형 변조기는 LMDA 와 NMDA 의 디지털 구동출력을 최종적으로 변조한 출력을 내게 된다.

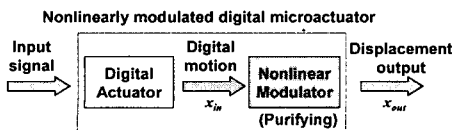


Fig. 1 Configuration of the nonlinearly modulated digital microactuator (NMDA)

Table 1 Geometry of the fabricated device

Components or parts		Dimension	
Structure thickness		t	40 μ m
Beam width		w	2.4 μ m
Length of beam 1		L_1	500 μ m
Length of beam 2	Linear	$(L_2)_L$	416 μ m
	Nonlinear	$(L_2)_{NL}$	500 μ m
Length of beam 3		L_3	500 μ m
Length of beam 4		L_4	500 μ m
Digital input displacement		x_{in1}	15.2 μ m
Proof mass 1		m_1	13.5 μ g
Proof mass 2		m_2	2.53 μ g
Stiffness of spring 1		k_1	1.11 N/m
Stiffness of spring 2	Linear	$(k_2)_L$	1.93 N/m
	Nonlinear	$(k_2)_{NL}$	1.11~4.16N/m
Stiffness of spring 3		k_3	0.555 N/m
Stiffness of spring 4		k_4	0.555 N/m

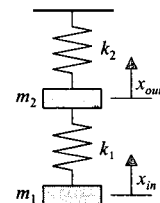


Fig. 2 Model of the micromechanical modulator, composed of two springs, k_1 and k_2

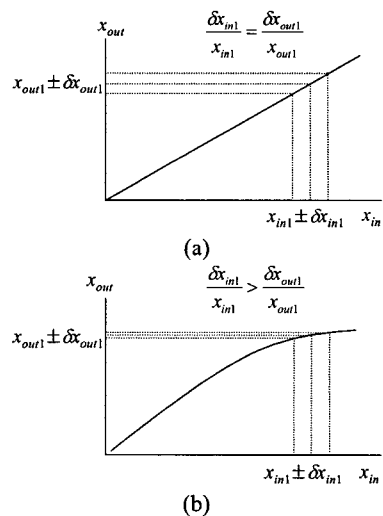


Fig. 3 Displacement modulation curves, x_{in} - x_{out} , of the micromechanical modulators, where x_{in1} , x_{out1} , δx_{in1} , and δx_{out1} are digital input displacement, digital output displacement, repeatability of digital input displacement, and repeatability of digital output displacement, respectively: (a) linear modulator; (b) nonlinear modulator

선형 및 비선형 기계적 변조기는 π 자형 보를 선형 스프링으로, 양단지지보를 비선형 스프링으로 각각 사용하여 각각 설계하였다. 보의 변형량이 보의 폭(w)과 비슷한 대변형 영역에서 양단지지보의 폭방향 변형은 보의 길이방향 인장을 일으키므로, 양단지지보의 강성은 변형이 커짐에 따라 증가하게 된다. 반면에 π 자형 보의 경우에는 두 보를 연결하는 π 자형 부분이 보의 길이방향으로 동일하게 움직일 수 있으므로, 보의 길이방향 인장이 일어나지 않게 된다. Table 1 과 같은 치수를 가지는 보를 유한요소해석하여 위와 같은 사실을 정량적으로 확인하였는데, 0~2.7 μm 의 동일한 변형 범위에서 양단지지보의 강성이 1.11N/m에서 4.16N/m로 증가한 반면에 π 자형 보의 강성은 1.11N/m로 일정하였다. 이러한 선형 및 비선형 변조기의 구동 입력과 구동 출력 사이의 관계는 Fig. 2의 모델에서 다음과 같이 표현된다.

$$(x_{out})_L = \frac{k_1}{k_1 + (k_2)_L} x_{in} \quad (1)$$

$$(x_{out})_{NL} = \frac{k_1}{k_1 + \int (k_2)_{NL} dx} x_{in} \quad (2)$$

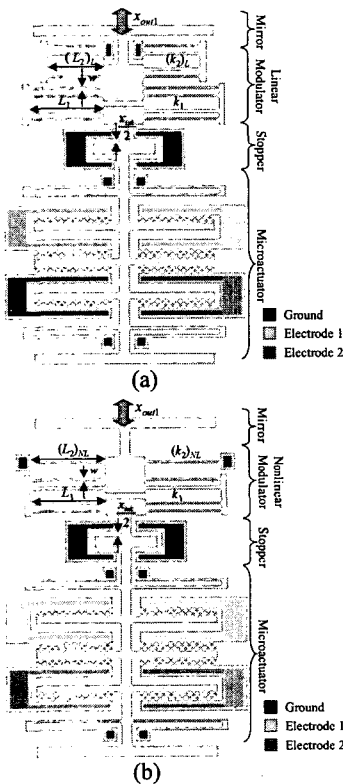


Fig. 4 Schematic view of the mechanically modulated digital microactuators using two different modulators: (a) linear modulator; (b) nonlinear modulator

식 (1)과 (2)에서 k_1 과 $(k_2)_L$ 은 선형 스프링 1 과 2 의 강성으로 상수값이고, $(k_2)_{NL}$ 은 비선형 스프링 2 의 변화하는 강성을 나타낸다. 유한요소해석에 의해 얻어진 스프링의 강성과 수식 (1), (2)를 사용하여, 선형 및 비선형 변조기가 15.2 μm 의 동일한 구동 입력에 대해 5.4 μm 의 동일한 구동 출력을 내도록 변조 곡선[Fig. 6(a)]을 설계하였다.

구동의 정도를 평가하기 위해, 구동의 반복능이라는 지표를 정의하여 사용하였는데, 여러 번 반복 구동한 구동거리로부터 구해진 표준편차의 2 배를 구동의 반복능으로 정의하였다. 기계적 변조기에 오차 (반복능 : δx_{in})가 포함된 구동 입력이 공급될 때 구동 출력의 반복능 δx_{out} 은 다음과 같이 표시된다.

$$\delta x_{out} = \frac{dx_{out}}{dx_{in}} \cdot \delta x_{in} \quad (3)$$

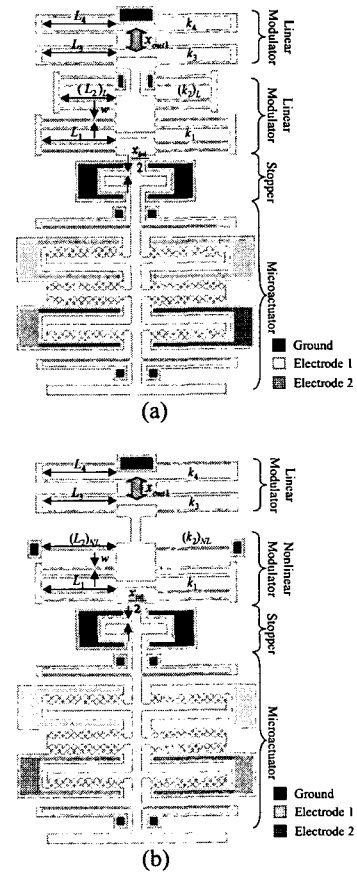


Fig. 5 Schematic view of the linear modulator attached to two different mechanically modulated digital microactuators: (a) linearly modulated digital microactuator (LMDA); (b) nonlinear modulated digital microactuator (NMDA)

식 (3)에서 (dx_{out}/dx_{in}) 은 변조 곡선의 기울기를 의미한다. 수식 (3)에 수식 (1), (2)를 대입하면 LMDA 및 NMDA의 구동 출력의 반복능 δx_{out} 이 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$(\delta x_{out})_L = \frac{k_1}{k_1 + (k_2)_L} \cdot \delta x_{in} \quad (4)$$

$$(\delta x_{out})_{NL} = \frac{k_1}{k_1 + (k_2)_{NL}} \cdot \delta x_{in} \quad (5)$$

건식식각 공정인 RIE(Reactive Ion Etching)에 의해 제작된 디지털 액추에이터의 경우에, 기계적 stopper 단면의 조도가 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 수준이므로, 두 개의 stopper 사이의 거리로 결정되는 구동 변위는 $70.7\text{nm} (\sqrt{((50\text{nm})^2 + (50\text{nm})^2)})$ 의 구동 반복능(δx_{in})을 가지게 된다. 따라서, 이론적으로는 선형적으로 변조된 구동 출력의 경우 25.9nm , 비선형적으로 변조된 구동 출력의 경우 15.4nm 의 구동 반복능(δx_{out})을 가지는 것으로 예측할 수 있다.

선형 변조기가 부착된 LMDA 및 NMDA에서, 부착된 선형 변조기는 구동 출력의 크기와 반복능을 감소시킨다. 두 경우에 대한 최종적인 변조 구동 출력(x_{final})과 구동 반복능(δx_{final})은 힘의 평형 관계와 수식 (3)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$(x_{final})_L = \frac{k_3}{k_3 + k_4} \cdot \frac{k_1}{k_1 + k_2 + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}} x_{in} \quad (5)$$

$$(x_{final})_{NL} = \frac{k_3}{k_3 + k_4} \cdot \frac{k_1}{k_1 + \left\{ (k_2)_{NL} dx \right\} / x_{out} + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}} x_{in} \quad (6)$$

$$(\delta x_{final})_L = \frac{k_3}{k_3 + k_4} \cdot \frac{k_1}{k_1 + k_2 + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}} \delta x_{in} \quad (7)$$

$$(\delta x_{final})_{NL} = \frac{k_3}{k_3 + k_4} \cdot \frac{k_1}{k_1 + \left\{ (k_2)_{NL} dx \right\} / x_{out} + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}} \delta x_{in} \quad (8)$$

상기 식에서 $(k_3)_L$ 과 $(k_4)_L$ 은 Fig. 5의 선형 스프링 3과 4의 강성이다. 유한요소해석에서 구한 스프링의 강성과 수식 (7), (8)을 이용하여, 최종적으로 변조된 구동 반복능은 선형 변조기가 부착된 LMDA의 경우 11.8nm , 선형 변조기가 부착된 NMDA의 경우 7.3nm 로 각각 예측되었다.

또한, LMDA와 NMDA가 제작공정시 과소 식각 혹은 과다 식각 되었을 경우, 각 소자의 구동 출력의 안정성을 다음과 같이 고려하였다. 비선형 변조기의 경우, Fig. 6(b)의 A 부분에 표시한 바와 같이 NMDA가 과소 식각이나 과다 식각에 의해 발생하는 변조기의 스프링 계수변화와 입력 구동기의 간격변화가 서로 상쇄되어 출력 구동이 제조공정 오차에 둔감하도록 설계하였다.

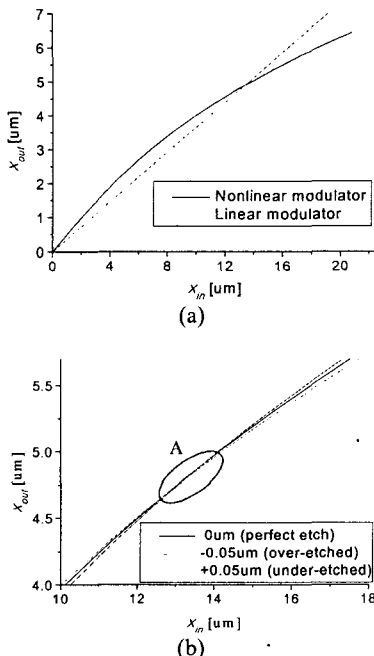


Fig. 6 Displacement modulation curves of the linear and nonlinear micromechanical modulators: (a) overall curves; (b) nonlinear modulation curves depending on the microfabrication error of $\pm 0.05\mu\text{m}$

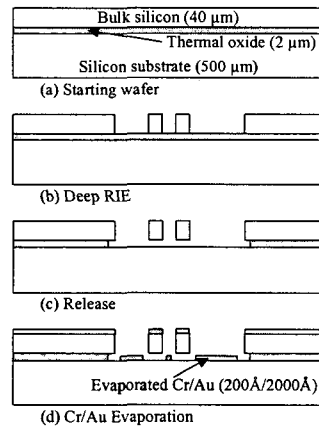


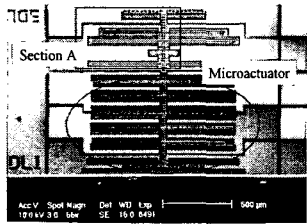
Fig. 7 Microfabrication process of the prototypes

3. 제작공정

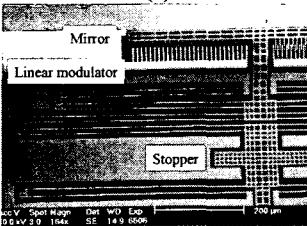
Fig. 4 와 Fig. 5 에 제시된 네 종류의 시제품은 Fig. 7 과 같이 SOI (Silicon On Insulator) 웨이퍼를 건식식각(RIE)한 단일 마스크 공정에 의해 제작되었다. 먼저 제조공정은 Fig. 7(a)와 같이 상부 실리콘 층의 두께가 $40\pm 1\mu\text{m}$ 이고 비저항 $0.1\text{ohm}\cdot\text{cm}$ 인 SOI wafer 를 Fig. 7(b)와 같이 한장의 마스크로 건식식각한다. 그 후, 실리콘 하부 $2\mu\text{m}$ 두께 산화막을

BOE(Buffered Oxide Etchant) 용액으로 습식 식각한다.[Fig. 7(c)] 최종적으로 Fig. 7(d)와 같이 200\AA / 2000\AA 두께의 Cr/Au 층을 마스크 없이 증착하여 전기배선 연결을 위한 패드를 형성한다.

제작된 LMDA 와 NMDA 의 SEM 사진이 Fig. 8 과 9 에, 출력단에 부가적인 선형 변조기가 부착된 LMDA 및 NMDA 의 SEM 사진이 Fig. 10 과 11 에 각각 도시되어 있다.

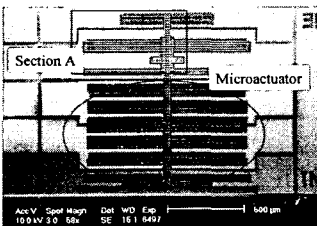


(a)

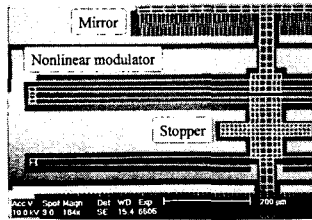


(b)

Fig. 8 SEM photographs of the linearly modulated digital microactuator (LMDA): (a) overall structure; (b) an enlarged view of the Section A in (a)

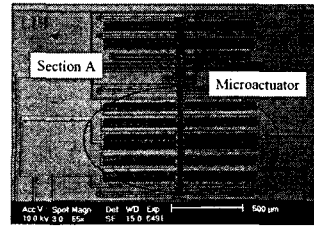


(a)

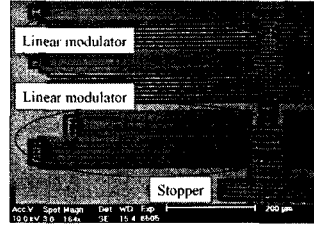


(b)

Fig. 9 SEM photographs of the nonlinearly modulated digital microactuator (NMDA): (a) overall structure; (b) an enlarged view of the Section A in (a)

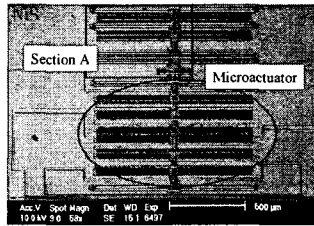


(a)

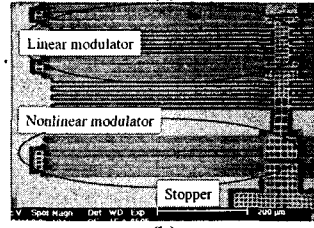


(b)

Fig. 10 SEM photographs of the linearly modulated digital microactuator attached to linearly modulated digital microactuator (L-LMDA): (a) overall structure; (b) an enlarged view of the Section A in (a)



(a)



(b)

Fig. 11 SEM photographs of the linearly modulated digital microactuator attached to nonlinearly modulated digital microactuator (L-NMDA): (a) overall structure; (b) an enlarged view of the Section A in (a)

4. 성능시험 결과

제작된 시편의 성능시험과 측정을 통하여 NMDA의 디지털 구동 안정 효과를 실험적으로 검증하였다. LMDA와 NMDA의 구동 출력을 나노미터 정도로 측정하기 위해, Fig. 12(a)와 같은 Mach-Zehnder 광간섭계를 사용하였으며, Fig. 12(b)에서 표시한 바와 같이 구동 출력부에 부착된 미소거울에 의해 레이저 광이 반사되게 하였다. 각 시제품은 60Hz, 25V의 사각파에 의해 구동되었고, 구동 출력 변위(x_{out})는 Fig. 13(a)의 두 지점(A, B)사이의 거리로부터 측정되었다. 이때 측정오차는 Fig. 13(b)에서 2.9nm로 판정되었다. 선형 변조기가 부착된 LMDA 및 NMDA의 경우, 위의 두 시편과 같은 구동조건하의 구동출력을 헤테로다인 광간섭계로 측정하였다. 이 경우의 측정오차는 7.7nm 이하이다.

제작된 선형 및 비선형 변조기의 이론적 변조 곡선과 측정된 변조곡선을 Fig. 14에서 비교하였다. 측정된 선형 변조곡선은 2.1%의 비선형성을 가지며, 측정된 비선형 변조곡선은 이론적 비선형 변조곡선과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

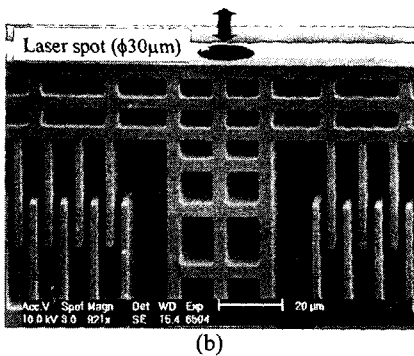
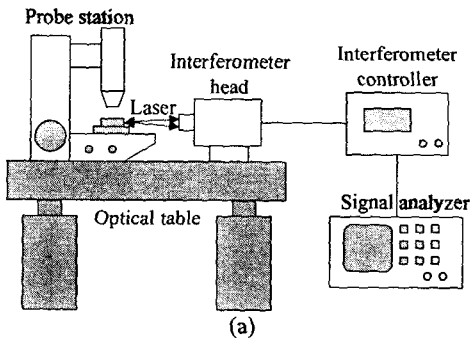


Fig. 12 Modulated displacement output measurement: (a) experimental apparatus; (b) laser spot on the vertical mirror

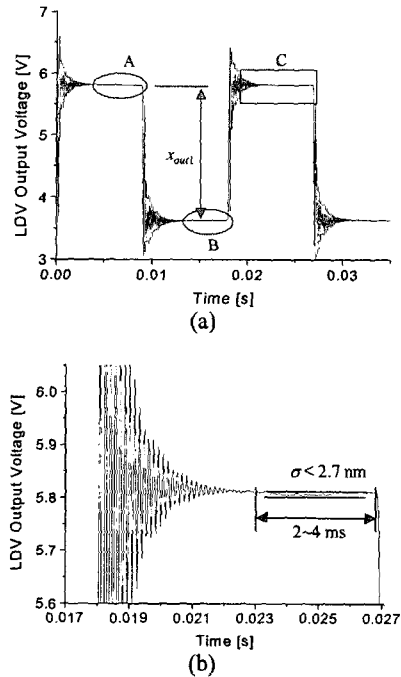


Fig. 13 Modulated displacement output measurement: (a) displacement output signal; (b) an enlarged view of the portion C in (a)

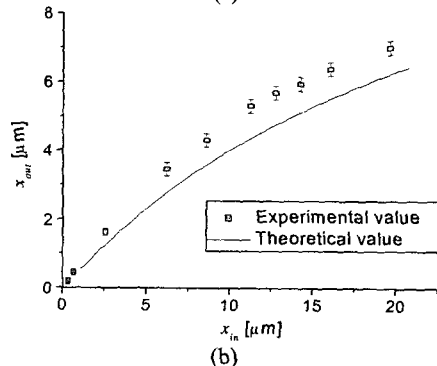
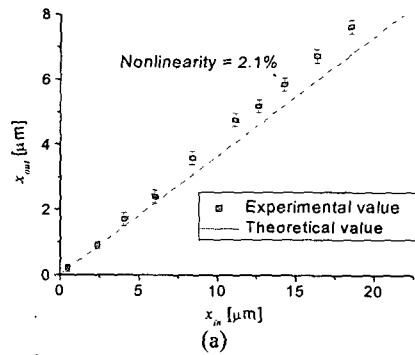


Fig. 14 Displacement modulation curves of the linear and nonlinear micromechanical modulators: (a) linear modulator; (b) nonlinear modulator

Table 2 Experimental and theoretical values of the repeatability in the modulated displacement outputs of the linearly and nonlinearly modulated digital actuators (LMDA and NMDA)

Prototype	Device #	Repeatability	
		Experimental	Theoretical
LMDA	1	25.2±2.9 nm	25.8 nm
	2	32.6±2.9 nm	
	3	25.6±2.9 nm	
NMDA	1	11.6±2.9 nm	15.4 nm
	2	11.0±2.9 nm	
	3	13.0±2.9 nm	
	4	13.4±2.9 nm	

Table 3 Experimental and theoretical values of the repeatability in the linearly modulated strokes from the output strokes of LMDA and NMDA

Prototype	Repeatability	
	Experimental	Theoretical
L-LMDA	15.7±7.7 nm	11.8 nm
L-NMDA	10.3±7.2 nm	7.3 nm

다음으로는 구동 정도의 평가를 위해, 제작된 LMDA 와 NMDA 의 구동 출력(둘 다 5.46±0.10µm 범위 내에 있음)을 각각 7 회 반복적으로 측정하였다. Table 2 에 표시된 반복능의 실험치는 측정된 구동출력 표준편차의 2 배(2σ)를 표시한 것으로, LMDA 가 27.8±2.9nm 의 구동 반복능을 보이는 반면에, NMDA 는 그보다 우수한 12.3±2.9nm 의 구동 반복능을 보이고 있다. Table 2 를 통해, NMDA 가 종래의 LMDA 보다 향상된 반복능을 가지는 구동을 출력함을 알 수 있다. 또, 동일한 선형 변조기가 부착된 LMDA 와 NMDA 의 성능 평가에서, 선형 변조기가 부착된 LMDA 가 15.7±7.7nm 의 구동 반복능을 출력한 반면에, 선형 변조기가 부착된 NMDA 는 10.3±7.2nm 의 구동 반복능을 보이고 있어, 보다 안정적인 구동을 출력하였다. Fig. 14, Table 2 및 3 을 통하여, NMDA 가 종래의 LMDA 에 비하여 구동출력의 반복능을 향상시키는 효과가 있음을 실험적으로 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 기계적 비선형 변조기가 부착된 디지털 액추에이터(NMDA)를 제안하고, NMDA 가 나노미터 정도의 디지털 구동을 출력할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 이를 위하여, 디지털 액추에이터에 부착된 두 종류의 변조기(선형

변조기와 비선형 변조기)를 동일 구동 입력(15.2 µm)을 동일 구동 출력(5.4µm)으로 변조하게끔 설계 제작하였다. 또한, LMDA 와 NMDA 에 동일한 선형 변조기가 부착된 한 조의 시편을 설계하고 제작하였다. 실험적으로 측정된 선형 및 비선형 변조곡선이 이론치와 잘 일치함을 확인하였으며, 구동 반복능의 실험치 비교를 통하여 NMDA 와 LMDA 의 구동 정도를 비교 평가하였다. 측정된 NMDA 의 구동 반복능(12.3±2.9nm)이 LMDA 의 구동 반복능(27.8±2.9nm) 보다 우수함을 확인하였다. 또한, 선형 변조기가 부착된 경우에도 NMDA 의 구동 반복능(10.3±7.2nm)이 LMDA 의 구동 반복능(15.7±7.7nm) 보다 우수함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 비선형 변조기를 이용하여 디지털 액추에이터의 구동 반복능을 향상시킬 수 있음을 실험적으로 증명하였으며, 이러한 NMDA 는 고정도 구동장치에 응용이 가능하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기판의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Cho, Y.-H., 1999, "Wireless Distributed Systems for Microenergy Information," *Proc. 5th World Micromachine Summit*, Glasgow, UK.
- (2) Viktorovitch, P., Leckerq, J.L., Spisser, A., Daleiden, J., Chitica, N., Strassner, M., Rondi, D., Goutain, E., Peerlings J., Pfeiffer, J., Riemenschneiger, R., Hjort, K., Greek, S., Benyattou, T. and Ledantec, R., 1999, "MOEMS Applications for Telecommunications," *Proc. 3rd Int. Conf. on Micro Opto Electro Mechanical Systems (MOEMS '99)*, Mainz, Germany, pp. 35~38.
- (3) Herzig, H.P. and Manzardo, O., 1999, "Miniaturized Fourier Transform Spectrometer," *Proc. 3rd Int. Conf. on Micro Opto Electro Mechanical Systems (MOEMS '99)*, Mainz, Germany, pp. 157~164.
- (4) Hosaka, S., 1996, "SPM Based Storage," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.32, No.3, pp.1873~1877.
- (5) Toshiyoshi, H., Kobayashi, D., Mita, M., Hashiguchi G., Fujita, H., Endo, J. and Wada, Y., 1999, "Micro Electro Mechanical Digital-to-Analog Converter," *Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai, Japan, pp. 994~997.
- (6) Yeh, R., Conant, R.A. and Pister, K.S., 1999, "Mechanical Digital-to Analog Converters," *Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai, Japan, pp. 998~1001.