

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.10.823

제조공정 오차보상용 보정 탄성체를 이용한 고정도 디지털-아날로그 구동기

한 원* · 이원철* · 조영호†

(2008년 1월 22일 접수, 2008년 5월 29일 수정, 2008년 9월 25일 심사완료)

High-Accuracy Digital-to-Analog Actuators Using Load Springs Compensating Fabrication Errors

Won Han, Won Chul Lee and Young-Ho Cho

Key Words : Digital-to-Analog Actuator(디지털-아날로그 구동기), Fabrication Error Compensation(제조공정 오차보상), High-Accuracy Actuation(고정도 구동)

Abstract

We present a high-accuracy digital-to-analog (DA) actuator using a load spring, specially designed to compensate the output displacement errors caused by fabrication errors. The compensated linear DA actuator is capable to change the slope of input-output modulation line in order to compensate fabrication errors. We design, fabricate, and characterize three different prototypes: one uncompensated design and two compensated designs respectively for a specific value and for a given range of fabrication error. The compensated linear DA actuators show the output displacement errors of $-0.20 \pm 0.23 \mu\text{m}$ and $-0.13 \pm 0.18 \mu\text{m}$, respectively, reduced by 64.3% and 76.8% of the output displacement error, $0.56 \pm 0.20 \mu\text{m}$, produced by the conventional uncompensated linear DA actuator. We experimentally verify the fabrication error compensation capability of the present compensated linear DA actuators, thus demonstrating high-accuracy actuation performance immune to fabrication errors.

기호설명

y	출력변위
x_{in}	입력변위
x_u	디지털 단위 변위
b	디지털 구동 상수
δ	제조공정 오차
ε	출력변위 오차
L	탄성체 빔의 길이
w	탄성체 빔의 폭

1. 서론

마이크로 소자를 이용한 초고속 광통신,⁽¹⁾ 고화질 디스플레이,⁽²⁾ 고밀도 데이터 저장기⁽³⁾와 같은 시스템을 구현하기 위해서는 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 정확도^(4,5)를 갖는 고정도 위치제어용 마이크로 구동기가 필요하다. 최근에, 기계적인 변조를 이용하여 전기적인 잡음에 강인하도록 하는 디지털-아날로그(Digital-to-Analog, DA) 구동기^(6,7)(Fig. 1)가 제안된 바 있다. 그러나, 이러한 DA 구동기는 제조공정 오차에 의한 구조의 치수 변화가 출력의 오차로 나타나므로 구동 정확도가 저하된다. 전형적인 빔 구조에서 제조공정 오차에 의한 치수 변화는 빔 폭에 대하여 10%⁽⁸⁾ 정도로 보고되고 있으며, 이러한 영향 때문에 기존의 DA 구동기⁽⁷⁾에서는 $0.65 \pm 0.15 \mu\text{m}$ 의 출력변위 오차가 발생하였다. 이러한 선형변조 DA 구동기의 문제를 해결하기 위

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-8691 FAX : (042)350-8690

* 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과, 디지털나노구동연구단

하여, 본 연구단에서는 제조공정 오차에 강인한 출력변위를 얻을 수 있는 비선형변조 특성을 지닌 구동기⁽⁹⁾를 제안한 바 있다. 이러한 비선형변조 구동기⁽⁹⁾는 정확도를 향상시킬 수 있지만 비선형적인 변조 특성(Fig. 2)에 의해 선형 출력의 한계를 가진다. 본 논문에서는 선형변조 특성을 지니면서 변조직선의 기울기 값이 제조공정 오차의 영향을 줄이는 방향으로 변화하도록 보정 탄성체를 설계하여 제조공정 오차로 인한 출력변위 오차를 줄일 수 있는 선형보정변조 DA 구동기를 제안한다.

Figure 2에서는 선형변조^(6,7), 비선형변조⁽⁹⁾와 제안된 선형보정변조 구동기의 특징을 비교하였다. 제조공정 오차 δ 에 의한 치수 변화 때문에 입력변위가 $x_{in}(0)$ 에서 $x_{in}(\delta)$ 로 변하면, 선형변조에서는 출력변위 오차 $\varepsilon_U(\delta)$ 가 발생한다. 비선형변조에서는 변조 특성의 비선형성을 이용하여 출력변위 오차를 $\varepsilon_N(\delta)$ 로 감소시킨다. 반면에, 제안된 선형보정변조에서는 변조직선의 기울기를 변화시켜 출력변위 오차를 $\varepsilon_C(\delta)$ 로 감소시키는 방법을 사용한다. 이때, 제조공정 오차에 따라 변조직선의 기울기를 변화시키기 위하여 특별히 고안된 보정 탄성체를 설계한다. 따라서, 선형보정변조 특성을 가진 DA 구동기는 비선형변조 구동기⁽⁹⁾에 비하여 전 구동범위에서 선형적인 출력을 갖는 동시에, 기존의 선형변조 DA 구동기^(6,7)에 비해서는 제조공정 오차를 보상하여 정확도가 높은 구동을 가능케 한다.

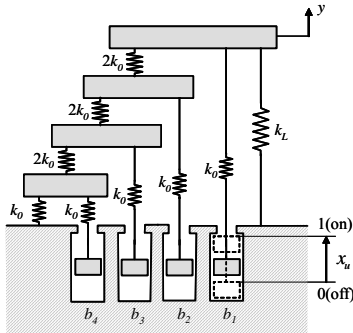


Fig. 1 Simplified model of the compensated linear DA actuator

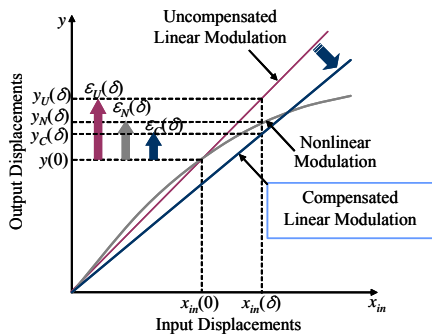


Fig. 2 Input and output modulation lines where the output displacement error, ε , is caused by the fabrication error, δ , for each modulation method

2. 이론적 해석 및 설계

2.1 출력변위 모델링

Figure 3은 4비트의 디지털 단위 구동기들로 구성된 선형보정변조 DA 구동기의 구조이다. 각각의 디지털 단위 구동기들은 강성이 k_0 인 연결 탄성체 5개, $2k_0$ 인 연결 탄성체 3개, 그리고 k_L 인 보정 탄성체 1개를 이용하여, Fig. 1과 같은 사다리 구조를 형성하고 있다. Figure 1에서 힘 평형으로부터 4비트의 디지털 구동기의 자유도를 그리면 Fig. 4와 같다. Figure 4에서의 평형 방정식으로부터 출력변위 y 는 다음과 같이 주어진다.

$$y = \frac{2k_0}{2k_0 + k_L} x_u \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right) \quad (1)$$

여기서 x_u 는 디지털 단위 변위를 의미하고 $b_i(i=1, \dots, 4)$ 는 디지털단위 구동기의 스위치를 켤 때 1, 끌 때 0을 나타내는 구동 상수를 의미한다.

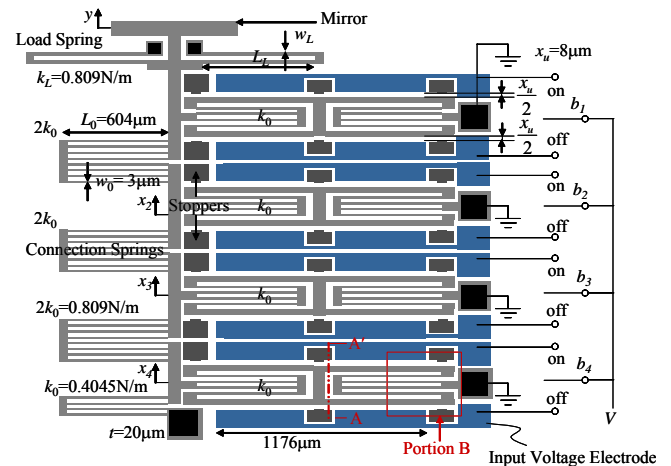


Fig. 3 Top view of the compensated linear DA actuator

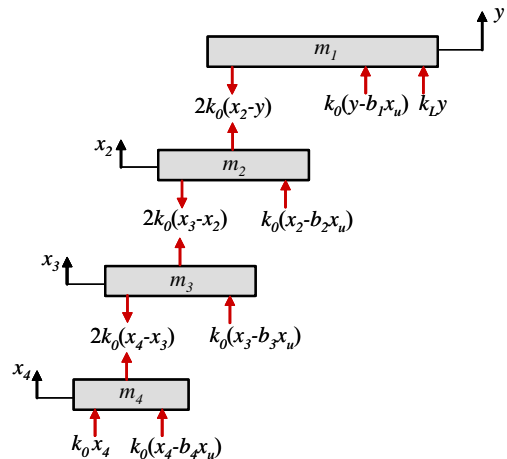


Fig. 4 Free-body diagrams of the compensated linear DA actuator

DA 구동기는 4 비트의 구동모드($b_1b_2b_3b_4$)를 (0000) 부터 (1111)까지 변화시킴에 따라 총 16 개의 다양한 출력변위를 만든다. 식 (1)에서 출력변위는 디지털 단위 변위와 탄성체들의 비율로만 구성되었음을 보여준다. 여기서 입력변위는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_m = x_u \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right) \quad (2)$$

식 (1)에서 4 개의 빔으로 구성된 연결 탄성체의 스프링 상수 k_0 와 2 개 빔의 대칭배열로 구성된 보정 탄성체의 스프링 상수 k_L 은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$k_0 = \frac{Etw_0^3}{L_0^3} \quad (3a)$$

$$k_L = \frac{Etw_L^3}{L_L^3} \quad (3b)$$

여기서 w_0 와 L_0 는 각각 연결 탄성체를 구성하는 빔의 폭과 길이를 의미하고, w_L 와 L_L 는 각각 보정 탄성체를 구성하는 빔의 폭과 길이를 의미하고, t 와 E 는 각각 빔의 두께와 탄성계수를 의미한다. 식 (3a)와 (3b)을 식 (1)에 대입하면 출력변위 y 는 다음과 같이 주어진다.

$$y = \left[\left(2 \frac{w_0^3}{L_0^3} \right) / \left(2 \frac{w_0^3}{L_0^3} + \frac{w_L^3}{L_L^3} \right) \right] x_u \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 보는 바와 같이, 출력변위 y 는 빔의 두께와 탄성계수와는 무관함을 알 수 있다. 결과적으로, 출력변위는 디지털 구동 상수, 디지털 단위 변위, 그리고 탄성체를 구성하는 빔의 폭과 길이의 함수로만 구성된다.

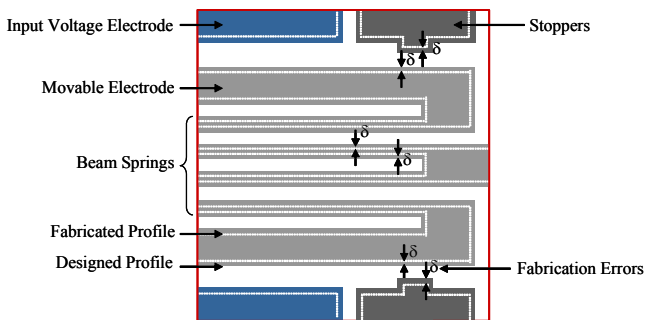


Fig. 5 Enlarged view of the portion B of Fig. 3 at the presence of the fabrication errors, δ

2.2 제조공정 오차 분석

리소그래피, 식각(RIE, DRIE), 금속박막증착⁽¹⁰⁾과 같은 공정을 거치고 나면 소자에는 Fig. 5 에서 보이는 바와 같이 제조공정 오차 δ 가 발생하여 제작된 소자의 치수는 설계한 소자의 치수와 차이⁽¹¹⁾를 갖게 된다. 본 연구에서는 Fig. 5 에서와 같이 탄성체를 구성하는 빔 사이의 공간을 동일하고 좁은 식각창을 갖도록 설계하고 디지털 단위 구동기의 간극과도 동일하게 설계하여 제조공정 오차 δ 에 동일한 영향을 받도록 설계하였다. 이러한 경우, 각 빔 사이의 식각 균일성⁽¹²⁾과 사각의 단면형상⁽¹³⁾을 구현할 수 있게 된다. Figure 5 에서와 같이 과다식각에 의한 제조공정 오차가 δ 인 경우, 탄성체들을 구성하는 빔의 폭은 2δ 만큼 줄어들게 되고, 디지털 단위 변위들은 4δ 만큼 늘어나게 될 것이다. 이러한 상황에서 출력변위 y 는 다음과 같이 표현된다.

$$y(\delta) = \left[\left(2 \frac{(w_0 - 2\delta)^3}{L_0^3} \right) / \left(2 \frac{(w_0 - 2\delta)^3}{L_0^3} + \frac{(w_L - 2\delta)^3}{L_L^3} \right) \right] \times (x_u + 4\delta) \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right) \quad (5)$$

여기서 탄성체 빔의 길이 L 에 대한 제조공정 오차 δ ($\delta \ll L$)의 영향은 무시하였다. 식 (5)로부터 이득함수 $G(\delta, w_L)$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$G(\delta, w_L) = \left(2 \frac{(w_0 - 2\delta)^3}{L_0^3} \right) / \left(2 \frac{(w_0 - 2\delta)^3}{L_0^3} + \frac{(w_L - 2\delta)^3}{L_L^3} \right) \times (x_u + 4\delta) \quad (6)$$

여기서 보정탄성체의 스프링 상수는 모두 $k_L = 0.809\text{N/m}$ 로 설계되기 때문에, 보정 탄성체 빔의 길이 L_L 은 보정 탄성체의 폭 w_L 에 의존하여 정해지게 된다. 결국, 이득함수는 식 (6)과 같이, 제조공정 오차 δ 와 보정탄성체의 폭 w_L 의 함수만으로 구성된다.

2.3 보정 탄성체 설계

본 연구에서 설계의 핵심은 보정 탄성체의 강성 k_L 을 동일한 값(0.809N/m)을 갖도록 설계하는 동시에, 16 개의 전 구동 모드에서 식 (6)의 이득함수 $G(\delta, w_L)$ 가 제조공정 오차에 대하여 둔감한 변화를 갖도록 하는 보정 탄성체의 빔의 폭 w_L 을 설계하는 데에 있다. 세 가지의 시제품 D1, D2, D3 의 보정 탄성체를 구성하는 빔의 폭을 설계하는 방법은 다음과 같다.

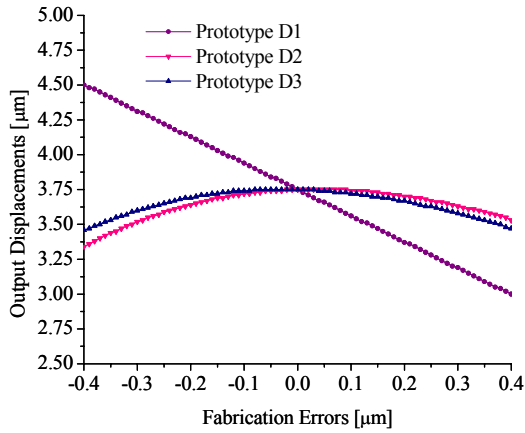


Fig. 6 The output displacement estimated from each prototype for varying fabrication errors at the digital actuation mode of (1111)

첫째, 시제품 D1 은 기존의 선형변조 특성을 가진 것으로서, 보정 탄성체를 구성하는 빔의 폭 w_1 은 아래 식 (7)과 같이, 연결 탄성체($k_0, 2k_0$)를 구성하는 빔의 폭 w_0 와 같이 $3\mu\text{m}$ 로 설계하였다.

$$w_L = w_0 \quad (7)$$

둘째, 선형보정변조 시제품 D2 은 아래 식 (8)과 같이, 보정 탄성체를 구성하는 빔의 폭 w_2 를 제조 공정 오차가 0 인 점에서 이득 함수 $G(\delta, w_L)$ 의 기울기가 0 이 되도록 하는 조건을 이용하여 $6\mu\text{m}$ 로 설계하였다.

$$\left. \frac{\partial G(\delta, w_L)}{\partial \delta} \right|_{\delta=0} = 0 \quad (8)$$

셋째, 선형보정변조 시제품 D3 은 아래 식 (9)와 같이, 보정 탄성체를 구성하는 빔의 폭 w_3 를 제조 공정 오차가 $-0.3\mu\text{m}$ 부터 0 인 범위 내에서 이득 함수 $G(\delta, w_L)$ 의 최대값과 최소값의 차가 최소가 되도록 하는 조건을 이용하여 그 해를 수치해석적으로 구한 $5.4\mu\text{m}$ 로 설계하였다.

$$\frac{\partial}{\partial w_L} [\max G(\delta, w_L) - \min G(\delta, w_L)]_{-0.3 < \delta < 0} = 0 \quad (9)$$

Figure 6 은 (1111) 구동모드에서 다양한 제조공정 오차에 대하여 예측되는 각 시제품의 출력변위를 보여준다. Figure 6 에서 보여지는 것처럼 제조공정 오차 $-0.3\mu\text{m} < \delta \leq 0$ 에서 시제품 D2 와 D3 가 시제품 D1 에 비하여 더 작은 출력변위 오차를 가질 수 있음을 예측할 수 있다.

Table 1 Designed and measured dimensions of the fabricated devices*

Geometric characteristics		Designed dimensions	Measured dimensions
Fabrication error		δ	$0\mu\text{m}$
Digital unit displacement		x_u	$-0.34 \pm 0.07\mu\text{m}$ (over-etched)
Connection spring beam width		w_0	$2.32 \pm 0.14\mu\text{m}$
Connection spring beam length		L_0	$605 \pm 0.5\mu\text{m}$
Load spring beam width	Prototype D1	w_1	$3\mu\text{m}$
	Prototype D2	w_2	$6\mu\text{m}$
	Prototype D3	w_3	$5.4\mu\text{m}$
Load spring beam length	Prototype D1	L_1	$479\mu\text{m}$
	Prototype D2	L_2	$959\mu\text{m}$
	Prototype D3	L_3	$863\mu\text{m}$

* Notations and other dimensions are shown in Fig. 3 for the digital actuators having an identical thickness of $20\mu\text{m}$.

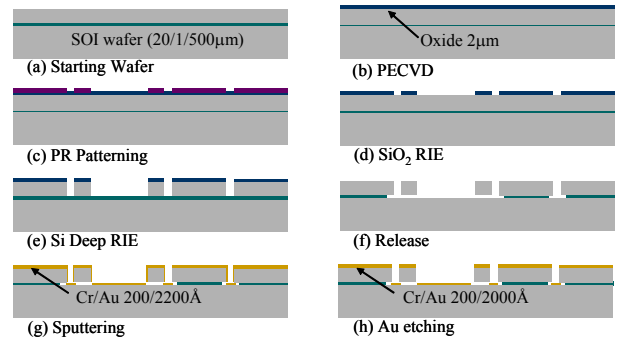


Fig. 7 Single-mask fabrication process for the cross section along A-A' in Fig. 3

3. 제작 공정

Figure 7 은 단일 마스크에 의하여 제작되는 본 연구에서 구동기의 공정 순서를 도시하였다. SOI (Silicon On Insulator) wafer(Fig. 7(a))의 윗면을 PECVD oxide 로 패터닝(Fig. 7(c))을 하고, 상부 실리콘 층 ($20\mu\text{m}$)을 DRIE 로 식각(Fig. 7(e))하여 시제품들의 구조를 형성한다. BOE (Buffered Oxide Etchant) 용액으로 내부의 oxide 층을 제거(Fig. 7(f))하고, 소자의 표면에 $200\text{\AA}/2200\text{\AA}$ 두께로 Cr/Au 층을 증착하여 전기적 접촉을 위한 패드를 형성한다. 그 후, 움직이는 전극과 stopper 와의 stiction 을 방지하기 위하여 증착된 200\AA Au 층을 Au etchant 를 이용하여 식각한다. Figures 8 과 9 는 소자의 전체 구조와 확대된 보정 탄성체 부분에 대한 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 각각 보여준다. Table 1 은 소자의 형상에 대해 설계한 치수와 측정된 치수를 정리한 것이다. Figure 10 은 stopper 부분의 확대된 사진을 보여준다.

Figure 10 에서 보여지는 것처럼 stopper 의 측면은 윗면에 수직함을 알 수 있다. 소자의 구동 시에는 움직이는 전극과 stopper 측면의 전면으로 안정된 접촉이 일어나게 된다. $0.01\mu\text{m}$ 의 치수 정확도를 가진 SEM scaler 를 이용하여 시제품들의 제조공정오차(과다식각, $-0.34\pm 0.07\mu\text{m}$)를 측정하였다.

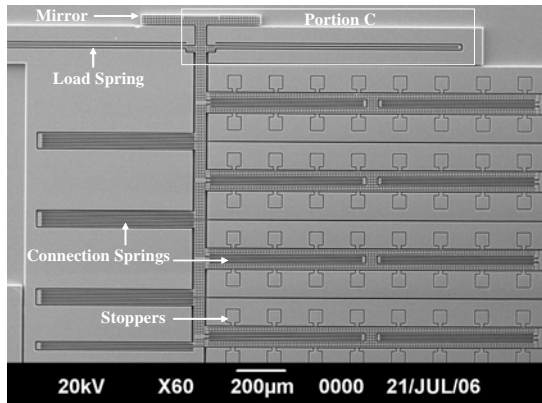


Fig. 8 SEM photograph of the compensated linear DA actuator

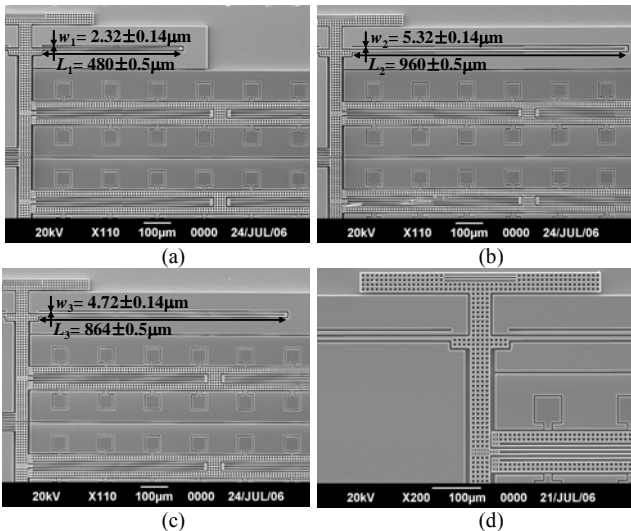


Fig. 9 Enlarged view of the load spring portion C in Fig. 8 (a) prototype D1; (b) prototype D2; (c) prototype D3; (d) the center of the load spring

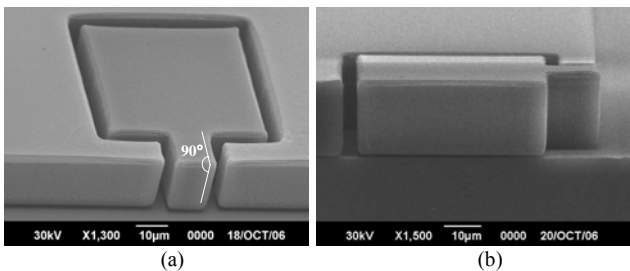


Fig. 10 Enlarged view of the stopper having a vertical sidewall: (a) top surface and sidewall; (b) cross-sectional profile

4. 측정 결과 및 고찰

제작된 선형보정변조 DA 구동기들의 각 단위 구동기는 100Hz, 12V 의 사각파로 구동되며, 공간 접계 LDV (Laser Doppler Vibrometer)에 의하여 출력 변위가 측정된다. 측정은 총 세 종류의 시제품 별로 각각 4 개의 소자를 16 개의 모드에 대해 각각 3 번씩 측정하여 출력변위 데이터를 얻는다. Figure 11 의 LDV 신호로부터 출력변위 y 를 얻었고, 이 때, 측정 불확실도(σ_y)는 Fig. 11 과 같다.

4.1 변조직선의 기울기

Figure 12 는 입력변위 $x_m(\delta)$ 에 대한 측정된 출력변위의 변조직선을 보여준다. 식 (2)와 식 (5)로부터 입력변위 $x_m(\delta)$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$x_m(\delta) = (x_u + 4\delta) \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right) \quad (10)$$

각각의 시제품에 대한 변조직선의 기울기는 입력 변위에 대한 출력변위 측정치를 최소자승법으로 구한 직선의 기울기로부터 구하였다.

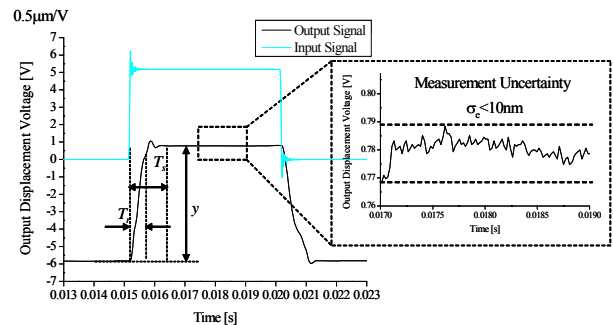


Fig. 11 Output voltage signals from LDV measuring output displacements

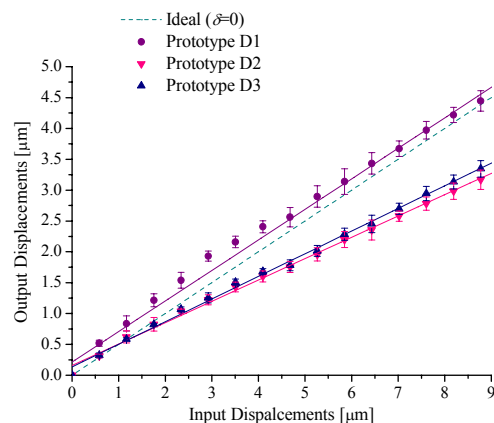


Fig. 12 Output displacement modulation lines for varying input displacements

Table 2 Theoretical and experimental modulation slopes

Prototypes	Modulation line slopes	
	Theoretical	Experimental
Prototype D1	0.5	0.495
Prototype D2		0.346
Prototype D3		0.367

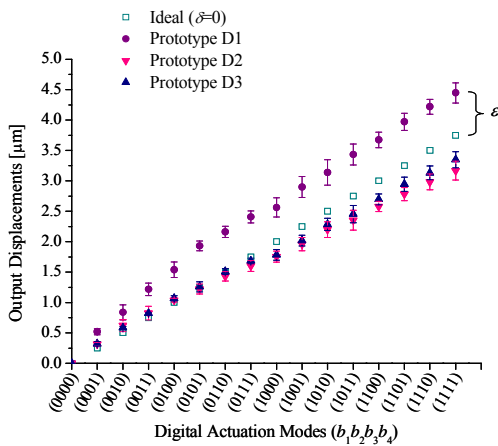
**Fig. 13** Output displacements for 4-bit digital actuation modes

Figure 12 와 Table 2 를 보면, 기존의 선형변조 시제품 D1 의 변조직선의 기울기 값 0.495 는 별도의 보정 기능 없이 단지, $\delta=0$ 인 경우의 이상적인 기울기 값 0.5 를 따라가는 것을 알 수 있다. 반면에, 제안된 선형보정변조 시제품 D2 와 D3 의 변조직선의 기울기는 출력변위 오차를 줄이는 방향으로 변화된 기울기 값인 0.346 과 0.367 로 각각 변화되었음을 보여준다.

4.2 출력변위 오차

Figure 13 과 14 는 각각 디지털 구동 모드에 대한 세 가지 시제품에서의 출력변위 y 와 출력변위 오차 ε 를 각각 보여준다. 출력변위 오차 ε 는 각각의 구동모드에서 이론적인 출력변위와 측정된 출력변위의 차로 부터 구해진다. Figure 14 로부터 전 구동모드에 대한 출력변위 오차의 최대값, 최소값, 평균값을 Table 3 에 정리하였다. Table 3 에서는 선형보정변조 시제품 D2 와 D3 에서 측정된 출력변위 오차가 각각 $-0.20\pm 0.23\mu\text{m}$ 와 $-0.13\pm 0.18\mu\text{m}$ 였음을 보여준다. 이것은 제안된 선형보정변조 시제품이 D2 와 D3 가 기존의 선형변조 시제품 D1 의 출력변위 오차의 평균 $0.56\pm 0.20\mu\text{m}$ 에 비하여 각각 64.3%, 76.8%만큼 감소된 출력변위 오차를 가짐을 보여준다. 또한, 이 결과는 이전의 논문⁽⁷⁾에서 보고한 선형변조 DA 구동기의 출력변위 오차에 비하여는 각각 69.2%, 80.0% 감소된 출력변위 오차임을 보여준다.

Table 3 Measured output displacement errors

Prototypes	Output displacement errors		
	Minimum (mode)	Maximum (mode)	Average*
Prototype D1	0.20 μm (0010)	0.92 μm (1011)	0.56 $\pm 0.20\mu\text{m}$
Prototype D2	0.00 μm (0100)	-0.74 μm (1111)	-0.20 $\pm 0.23\mu\text{m}$
Prototype D3	-0.01 μm (0101)	-0.56 μm (1110)	-0.13 $\pm 0.18\mu\text{m}$

* The average denotes the mean and standard deviation of all output displacement errors for total digital actuation modes.

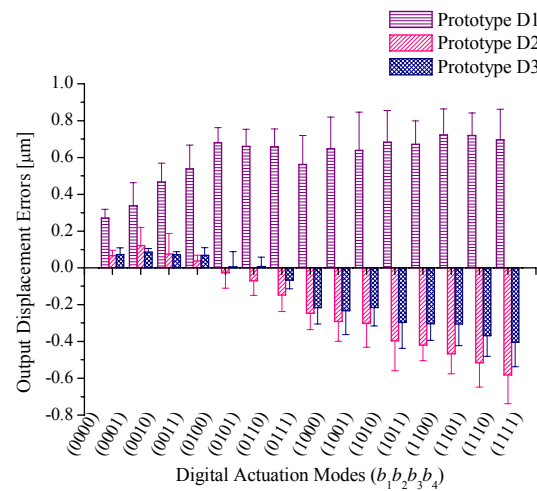
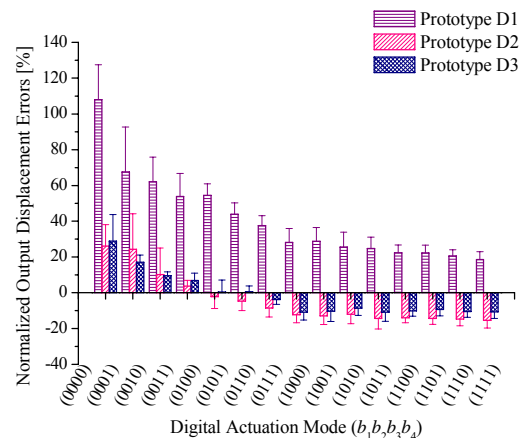
**Fig. 14** Output displacement errors for 4-bit digital actuation modes**Fig. 15** Normalized output displacement error for 4-bit digital actuation modes

Figure 15 는 출력변위 오차를 각 디지털 구동 모드에 대한 이론적인 출력변위 값으로 정규화시킨 출력변위 오차의 분포를 보여준다. Figure 15 에서는 기존의 선형변조 시제품 D1 에 비하여 본 연구에서의 선형보정변조 시제품 D2 와 D3 가 전 구동 모드에 대하여 더욱 균등한 출력변위 오차를 발생시킴을 보여준다.

Table 4 Measured dynamic characteristics of the compensated linear DA actuator

Dynamic characteristics		Values (mode)
Rising time (T_r)	Minimum	0.36ms (0111)
	Maximum	0.92ms (0010)
	Average*	0.53±0.12ms
Settling time (T_s)	Minimum	0.51ms (1101)
	Maximum	1.47ms (0010)
	Average*	0.97±0.21ms
Resonant frequency at the first mode		3.7kHz
Life time		< 10 ⁷ cycle (1111)

* Each average denotes the mean and standard deviation of all rising and settling time for total digital actuation modes.

4.3 동 특성

Table 4 는 선형보정변조 DA 구동기의 동 특성을 나타내는 상승시간⁽¹⁴⁾ T_r , 정착시간⁽¹⁴⁾ T_s , 공진주파수, 수명을 보여준다. 모든 시제품들에 대해서 동 특성은 동일하게 측정되었기 때문에, 본 연구에서 동 특성 측정은 시제품 D3 에서 하나의 표본 소자를 추출하여 결과를 얻었다. 응답 시간 측정을 위해, 표본 소자는 300Hz, 12V 의 사각파로 구동되며, 광 간섭계 LDV 에 의하여 출력변위의 응답 시간을 측정하였다. 물론, 이러한 응답시간은 인가하는 전압이 12V 이상으로 높아질 경우, 정전기력 평판 구동기의 pull-in 영역에 차이가 생기므로 응답시간은 더욱 빨라질 것으로 예상되지만, 본 연구에서는 낮은 전압 구동이 더욱 중요하기 때문에 12V 를 사용하였다. 초기 구동모드를 (0000)으로 하여 (0001)부터 (1111)까지 각각의 구동모드에 대하여, 각각 3 번씩 측정하여 결과를 얻었다. 전 구동모드에 대하여 상승시간⁽¹⁴⁾ T_r 과 정착시간⁽¹⁴⁾ T_s 은 각각 0.53±0.12ms 과 0.97±0.21ms 로 측정되었다. 공진 측정에서는, 첫 번째 모드에서의 공진주파수 3.7kHz 를 측정하였으며, 수명 측정에서는 (1111) 구동모드에서 10⁷ cycle 을 측정하였다. 10⁷ cycle 이상에서는 움직이는 전극과 stopper 사이의 stiction 으로 인해 표본 소자가 더 이상 구동하지 않음을 관찰할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 제조공정 오차보상을 위하여 설계된 보정 탄성체를 이용하는 새로운 개념의 고정도 디지털-아날로그 (Digital-to-Analog, DA) 구동기를 제안하였다. 제조공정 오차보상 기능을 확인하기 위해서 기존의 선형변조 DA 구동기(시제품

D1)와 제안하는 선형보정변조 DA 구동기(시제품 D2 와 D3)를 각각 설계하고 제작하여 성능을 비교하였다. 선형보정변조 구동기의 시제품 D2 와 D3 에서는 각각 특정한 제조공정 오차값($\delta=0$)과 특정 제조공정 오차영역($-0.3\mu\text{m}<\delta<0$)에 대하여 변조직선의 기울기 값이 제조공정 오차의 영향을 줄이는 방향으로 변화하도록 보정 탄성체의 폭을 설계하였다. 실험결과들로부터, 제안하는 선형보정변조 DA 구동기의 시제품 D2 와 D3 는 기존의 선형변조 DA 구동기의 시제품 D1 에서 측정된 출력변위 오차 0.56±0.20 μm 보다 작은 0.20±0.23 μm 와 -0.13±0.18 μm 로 각각 측정되었으며, 이 값은 선형변조 DA 구동기에서 측정된 출력변위 오차보다 각각 64.3%, 76.8% 만큼 감소되었음을 확인하였다. 선형보정변조 구동기의 동 특성 측정에서는, 응답시간이 1.5ms 이하로 측정되었고, 공진주파수는 3.7kHz 로 측정되었고, 수명은 10⁷ cycle 로 측정되었다. 결국, 본 논문에서는 제조공정 오차에 의한 영향을 줄여 고정도 구동을 출력할 수 있는 선형보정변조 DA 구동기의 제조공정 오차보상 능력을 실험적으로 증명하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Li, J., Liu, A.Q., Zhong, W. D., Zhang, Q. X. and Lu, C., 2004, “MEMS Switch Based Serial Reconfigurable OADM,” *Optics Communications*, Vol. 230, pp. 81~89.
- (2) Hagelin, P. M. and Solgaard, O., 1999, “Optical Raster-Scanning Displays Based on Surface-Micromachined Polysilicon Mirrors,” *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 5, pp. 67~74.
- (3) Imamura, T., Katayama, M., Ikegawa, Y., Ohwe, T., Koishi, R. and Koshikawa, T., 1998, “MEMS-Based Integrated Head/Actuator/Slider for Hard Disk Drives,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 3, pp. 166~174.
- (4) Wu, M. C., 1997, “Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, pp. 1833~1856.
- (5) Koganezawa, S., Unematsu, Y. and Yamada, T., 1999, “Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives Using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, pp. 988~992.
- (6) Toshiyoshi, H., Kobayashi, D., Mita, M., Hashiguchi, G.,

- Fujita, H., Endo, J. and Wada, Y., 2000, "Microelectromechanical Digital-to-Analog Converters of Displacement for Step Motion Actuators," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, pp. 218~225.
- (7) Yeh, R., Conant, R. A. and Pister, K. S., 1999, "Mechanical Digital-to-Analog Converters," in *Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, pp. 198~1001.
- (8) Hong, Y. S., Lee, J. H. and Kim, S. H., 2000, "A Laterally Driven Symmetric Micro-Resonator for Gyroscopic Applications," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 10, pp. 452~458.
- (9) Lee, W. C., Jin, Y.-H. and Cho, Y.-H., 2002, "Nonlinearly Modulated Digital Microactuators for Nano-Precision Digital Motion Generation," in *Proc. 15th Int. Conf. IEEE MEMS*, pp. 594~597.
- (10) Wittwer, J. W., Baker, M. S. and Howell, L. L., 2006, "Robust Design and Model Validation of Nonlinear Compliant Micromechanisms," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 15, pp. 33~41.
- (11) Liu, R., Paden, B. and Turner, K., 2002, "MEMS Resonators that are Robust to Process-Induced Feature Width Variations," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 11, pp. 505~511.
- (12) Grade, J. D., Jerman, H. and Kenny, T. W., 2003, "Design of Large Deflection Electrostatic Actuators," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 12, pp. 335~343.
- (13) Jerman, J. H., Grade, J. D. and Drake, J. D., 1999, "Electrostatic Microactuator and Method for Use Thereof," U. S. Patent 5998906.
- (14) Ogata, K., 1998, *System Dynamics*. New Jersey: Prentice Hall, pp. 373~374.