MEMS 용 double-folded 스프링의 회전강성 개선 및 실험 평가

황일한* (MEMS & Nanophotonics Lab., GIST), 김좌일 (ISD Lab., GIST),
왕세명 (ISD Lab., GIST), 이종현 (MEMS & Nanophotonics Lab., GIST)

Experiment characterization of the improvement of the rotational stiffness of the double-folded springs for MEMS structures

I. –H. Hwang* (MEMS & Nanophotonics Lab., GIST), C. –I. Kim (ISD Lab., GIST),
S. –M. Wang (ISD Lab.), GIST), and J. –H. Lee (MEMS & Nanophotonics Lab., GIST),

ABSTRACT

Compared to the simple-beam springs, double-folded springs have advantages of the linearity even at the long stroke, so that they have been widely used for optical components such as optical switches and optical attenuators. Until now only the stiffness of the double-folded springs in the perpendicular direction of the shuttle movement has been considered for the stable operation, however, the rotational stiffness of the springs has not been researched as much. Therefore, this paper suggests the double-folded springs of the maximum rotational stiffness with the constant stiffness in the stroke direction using the reliability based topology optimization (RBTO), whose operation properties were experimentally characterized.

Key Words : Double-folded springs (이중 빔 스프링), Rotational stiffness (회전강성), MEMS (미소기전시스템), RBTO (신뢰성기반위상최적화)

1. 서론

단순빔 스프링에 비해 double-folded 스프링은 큰 변위량에 대해서도 선형성이 유지되는 장점이 있어서, 광 스위치 및 광 감쇠기 등과 같이 큰 변위량이 필요한 소자에 많이 응용되고 있다 [1, 2]. 그런데 double-folded 스프링의 안정구동에 대한 기존의 연구에 있어서, double-folded 스프링의 회전강성은 고려하지 않고, 셔틀과 수직방향으로의 강성만을 고려하거나 스프링을 기울여서 설계함으로써 안정한 구동범위를 넓히고자 하였다 [3, 4]. 하지만 Double-folded 스프링이 광스위치 혹은 광감쇠기 등에 사용될 때 스프링에 연결된 구조물의 작은 요동도 소자의 성능에 크게 영향을 미치기 때문에, 외란에 강한 구조물을 설계하기 위해서는 double-folded 스프링의 회전강성을 최대화 할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 셔틀 구동방향으로는 일정한 강성을 가지면서 회전강성을 최대로 할 수 있는 double-folded 스프링을 신뢰성기반위상최적화기법 (RBTO)을 이용해서 제안하고, 실험을 통해서 그 특성을 평가하고자 한다.

2. 구조

그림 1 은 회전강성을 최대로 하기 위한 double-folded 스프링의 기본 구조와 최적화 변수들을 나타낸다. X_1 와 X_2 은 double-folded 스프링에서 내부 빔과 외부 빔들 사이의 간격을 나타내고, X_3 와 X_4 는 빔의 길이와 두께를 나타낸다. 최적화는 신뢰성기반 위상최적설계(RBTO)를 통해서 이루어졌으며, 구동방향으로 일정한 선형강성을 유지하면서, 최대의 회전강성을 가지도록 변수 값을 선정하였다.

그림 2(a)는 초기 double-folded 스프링 구조를 나타내는데, 각 빔의 초기 길이와 폭이 각각 800μm 와 2 μm 이고, 구조물 높이가 80 μm 이도록 설계되었다. 따라서, 최대회전강성을 얻기 위한 형상변화가 이루어지더라도, 구동방향 강성(K_x)는 0.4 N/m 의 일정한 값을 갖도록 하였다. (b)는 deterministic 위상설계법에 의해 설계된 구조인데 제작의 uncertainty 등에 매우 민감하다는 단점이 있어서, RBTO 방법을 이용하여 (c)와 같이 uncertainty 에 둔감한 구조를 얻을 수 있었다. 하지만, 초기

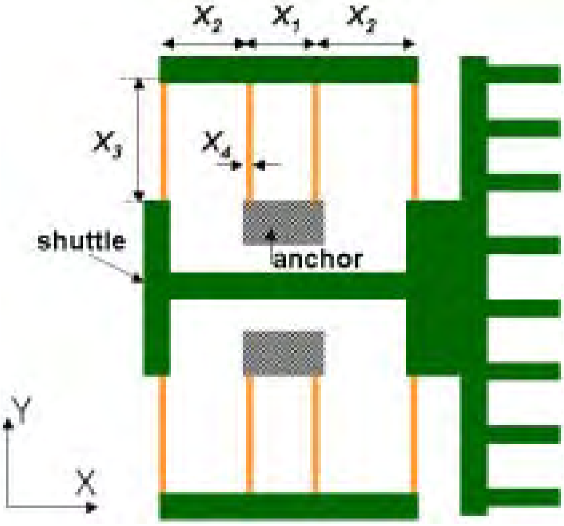


Fig. 1 Schematic of the double-folded springs with the design parameters of optimization.

모델에 비해 소자의 크기가 매우 크기 때문에, (c) 모델의 절반크기에서 최대회전강성을 가지는 스프링 구조를 (d)와 같이 얻었다. 그런데 그림 2(b)~(d)의 구조는 모두 최적화 변수들의 값들 만을 변화시킴으로써 최대 회전강성을 얻고자 하는 것이다. 그래서 (e)는 (d)와 같은 소자의 크기를 가지지만 변수들의 값들 뿐만이 아니라, 형상의 변화 또한 허용함으로써 보다 높은 회전강성을 가지는 double-folded 스프링 구조이다. ANSYS 해석을 통해서 각 모델의 회전강성이 각각 $1.16e^{-4}$, $1.303e^{-2}$, $1.266e^{-2}$, $4.878e^{-3}$, 그리고 $5.87e^{-3}$ Nm 의 값을 가지는 것을 확인하였다. (d)와 (e) 모델이 (b)와 (c) 모델에 비해 회전강성이 작지만 소자의 크기가 반으로 줄뿐만 아니라, 초기모델에 비해서는 회전강성이 크게 증가했기 때문에, (e)와 같이 최적화 변수 값 뿐만이 아니라 형상변화를 통해 얻어진 최적화 구조가 구조가 보다 큰 장점이 있다고 할 수 있다.

3. 실험 및 특성평가

앞에서 설계한 소자의 회전강성 특성을 평가하기 위해서 3μm 의 SiO_2 희생층 위에 80 μm 의 구조층을 가지는 silicon-on-insulator (SOI) 웨이퍼를 DRIE 공정을 통하여 제작하였다. 그림 3 은 실제 제작된 double-folded 스프링의 SEM 이미지이다. Double-folded 스프링의 셔틀에 모멘트를 인가하기 위해서, 그림 2 의 모든 스프링구조의 셔틀이 동일한 길이를 갖도록 설계하였고, 셔틀의 양끝에 평행판 구동기를 셔틀과 수직방향으로 설계함으로써, 셔틀에 모멘트를 인가할 수 있도록 하였다. 평행판 구동기에 정전력이 인가되었을 때 나타나는 셔틀의 수직 변위량을 측정하기 위해서, 광섬유를 mirror 면에 수직방향으로 고정시켰고, 광섬유 끝 단과 mirror 면 사이에서 발생한 간섭무늬를 optical spectrum analyzer 를 통해서 측정함으로써, 평행판 구동기의 구동 전/후의 간섭무늬의 파장변화로부터 변위량을 측정할 수 있었다 [5].

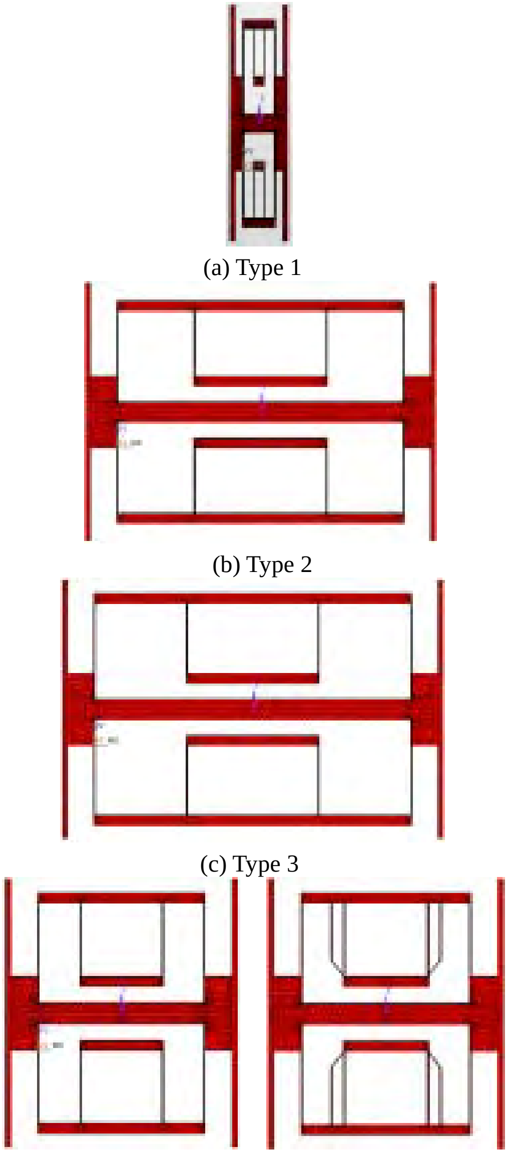


Fig. 2 Optimization model; (a) initial model, (b) deterministic model, (c) RBTO, (d) RBTO with half device size, and (e) RBTO with shape change.

그림 4(a)는 평행판 구동기에 전압을 인가할 때 셔틀의 수직방향으로 나타나는 변위량을 측정한 결과이다. 구동전압을 증가시킴에 따라서 수직 변위

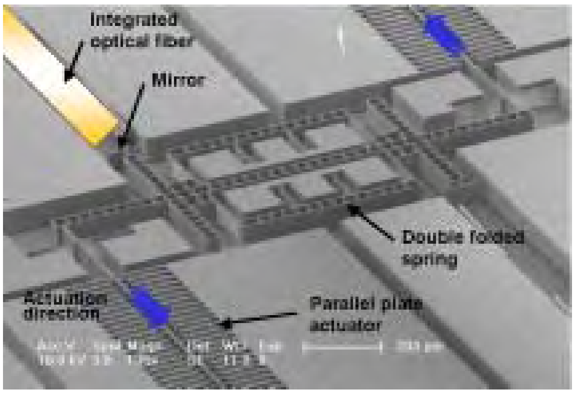
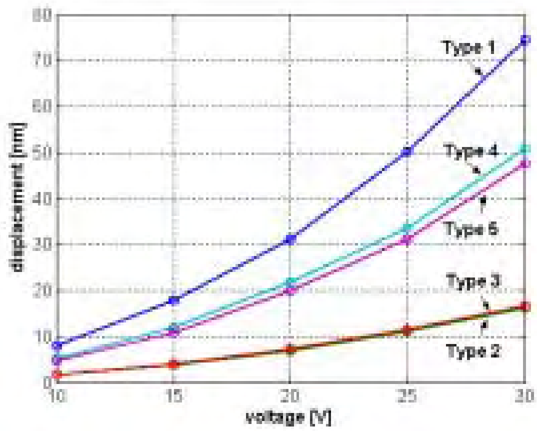
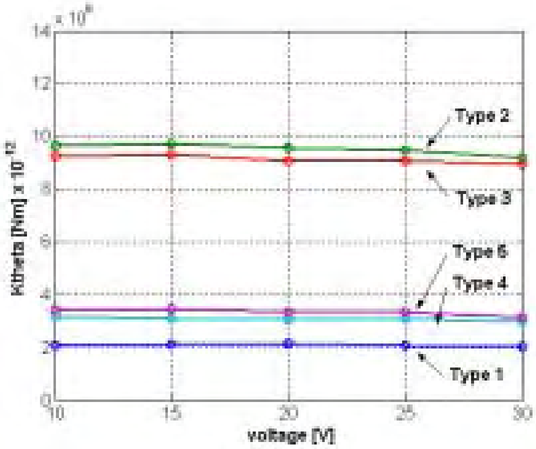


Fig. 3 SEM image of the fabricated double-folded springs with the aligned optical fiber for displacement measurement.



(a) displacement



(b) K_{theta}

Fig. 4 Experiment results of the double-folded springs with respect to the driving voltage; (a) displacement and (b) K_{theta}.

량이 증가하였고, 각 모델마다 다른정도의 수직 변위량이 나타났다. 그림 4(b)는 (a)에서 측정된 수직 변위량과 평행판 구동기의 정전력으로부터 계산한 회전강성을 도시한 그림이다. 전압이 증가해도 회전강성의 크기가 거의 일정한데, 이것은 수직 변위량이 70 nm 이하의 작은 양이기 때문인 것으로 생각된다. ANSYS 해석으로부터 Type 1 이 가장 작은 회전강성을 가지고, Type 4 와 5 그리고 Type 3 와 2 의 순서로 높은 회전강성을 가짐을 확인하였는데,그림 4(b)의 결과에서도 각 모델이 ANSYS 해석에서와 같은 순서로 회전강성 값이 나타났다. 하지만 회전강성 크기는 ANSYS 해석에서 얻은 값과 일치하지 않았는데, 이것은 실험에서 사용한 구조는 셔틀에 연결된 평행판구동기가 단순빔 스프링에 의해 anchor 에 지지되고 있기 때문으로 생각된다.

Type 3 은 Type 2 보다 제작 uncertainty 를 보완한 구조로서 다소 높은 회전강성이 나타났고, Type 5 는 최적화변수의 값만을 변화시키는 Type 4 를 스프링 형상변화까지 허용함으로써 얻어진 최적화 구조로써 보다 높은 회전강성 값이 나타남을 확인하였다.

4. 결론

기존의 double-folded 스프링 구조에 대한 연구는 큰 변위량에 대해서 안정한 구동을 얻기 위해서 셔틀 구동방향의 수직방향으로의 강성만을 고려해서 최대 안정구동범위를 예측하였다. 하지만 광소자와 같이 스프링에 연결된 구조물의 작은 요동도 소자의 성능에 크게 영향을 미치는 경우에는 double-folded 스프링의 회전강성을 최대화 할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 회전강성에 영향을 미치는 double-folded 스프링의 주요 설계변수를 찾고, 이를 신뢰성기반위상최적화 방법을 이용해서 최대의 회전강성을 갖는 스프링 구조를 얻을 수 있었다. 설계된 스프링구조의 성능을 평가하기 위해서 SOI 웨이퍼를 이용해서 실제 제작을 하였고, 광섬유를 이용한 변위측정을 통해서 최적화된 스프링구조의 회전강성이 초기 모델보다 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 최적화 변수 및 형상 변화를 이용한 parametric study 를 통하여 향상된 회전강성 값을 실험적으로 얻었으며, 따라서 대변위 구동용의 double-folded 스프링에 대하여 보다 안정한 설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. J. -H. Lee, M. -L. Lee, W. -I. Jang, C. -A. Choi, and J.

-W. Joo, “Bi-stable planar polysilicon microactuators with shallow arch-shaped leaf springs,” *Proc. SPIE Micromachined Device*, vol. 3876, pp. 274-279, 1999.

2. W. Noell, L. Dellmann, C. Marxer, K. Weible, M. Hoffmann, and N. F. de Rooij, “Hybrid 4X4 optical cross connector based on MEMS switches and integrated optical waveguides,” *Optical MEMS 2001*, pp. 13 –14, 2001.
3. G. Zhou and P. Dowd, “Tilted folded-beam suspension for extending the stable travel range of comb-drive actuators,” *J. Micromech. and Microeng.*, 13, pp.178-183, 2003.
4. R. Legtenberg, A. W. Groeneveld, and M. Elwenspoek, “Comb-drive actuators for large displacements,” *J. Micromech. and Microeng.*, 6, pp.320-329, 1996.
5. I. -H. Hwang, E. -S. Yun, and J. -H. Lee, “A Nano-resolution Reaction-Force Actuator (RFA) using MEMS Technology,” *KMEMS*, pp.11-14, 2005.