

## 마이크로 Inchworm motor 용 Hinge 구조의 특성 해석

김 원효\*, 권 호남, 김 영운, 윤 성식, 이 종현  
광주과학기술원 기전공학과

### Analysis of hinge structures for micro inchworm motor

Won-Hyo Kim\*, Ho-Nam Kwon, Young-Yun Kim, Sung-Sik Yun, Jong-Hyun Lee  
Department of Mechatronics, Kwangju Institute of Science and Technology(K-JIST)

#### ABSTRACT

This paper describes the characteristic of hinges on which a lever pivots within a limited angle due to the torque. The hinges are exerted by the thermally expanded actuators connected with a lever through hinges. To enhance the stroke of inchworm actuator, FEM(Finite Element Method) was utilized for the characterization in view of stress, displacement according to the variation of notch radius and notch width. As a result, notch width of the hinges plays an important part in improvement of micro inchworm actuator.

**Key Words** : MEMS(Micro Electro Mechanical System), thermoelastic(열탄성), micro actuator(마이크로 액츄에이터), lever(지렛대), inchworm(인치웜), hinge(힌지), FEM(유한 요소법)

#### 1. 서론

최근 WDM(Wavelength Division Multiplexer) 광통신의 급속한 발달에 따라 관련 소자를 개발하는데 있어서 커다란 역할을 할 수 있는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술이 많이 부각되고 있다.[1] 이 중에서 micro assembly, 스웨이칭 소자 등에 응용하기 위한 마이크로 액츄에이터(micro actuator)에 대한 관심이 증가되고 있으며, 이미 낮은 소비 전력, 높은 안정성을 가지며, surface micromachining 과 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 공정을 통한 인치웜(inchworm) 모터용 micro machined thermoelastic 액츄에이터가 소개되었다.[2]

힌지(hinge)를 이용한 마이크로 액츄에이터의 발생 변위 및 힘의 크기는 힌지의 두께, 폭, 높이에 크게 영향을 받는다.[3] 이에 따라 힌지 부분의 설계가 마이크로 소자(device)의 전체적인 작동 거리 및 발생하는 힘에 커다란 영향을 미친다. 본 논문에서는 인치웜 모터용 마이크로 액츄에이터에 대한 힌지 부분의 특성 해석을 위해 힌지 부분에 둥근 모양의 노치(notch)를 주고, 노치의 반지름의 변화

및 두 노치 사이 폭의 변화에 따라 특성을 계산하였다. 해석에서는 ANSYS 를 이용한 유한요소(FEM) 방법을 사용하였으며, 힌지 형태에 따른 구조물의 변위, 응력 및 강성에 대해 분석하였다. 특히 optical device 에 응용하기 위해서는 구동 범위가 중요하므로, 강성보다는 변위와 응력 관점에 좀더 초점을 두었다.

#### 2. Hinge 를 이용한 인치웜 모터의 구조

그림 1 은 마이크로 인치웜 모터 액츄에이터의 전체적인 모습이다. 마이크로 인치웜 모터 액츄에이터의 구동은 전극 단자에 전압이 인가되면, active bar 의 저항에 의한 열팽창을 이용하여 구조물이 움직이게 된다. 여기에서 발생하는 변위의 크기를 최대로 증대시키기 위해 구동 힌지 부분을 지렛대(lever) 모양으로 설계하여 작은 구동 전압 및 적은 변위로도 실제 접촉되는 첨단부(forked tip) 부분에서는 커다란 변위를 발생시킬 수 있게 한다. 하지만 이런 지렛대 구조만으로는 어느 정도 이상의 변위를 발생시키기에는 무리가 있으므로 힌지 구조를 달리

설계하고 그에 따른 힌지 및 첨단부의 변위 및 응력 상태에 대해 살펴보았다.

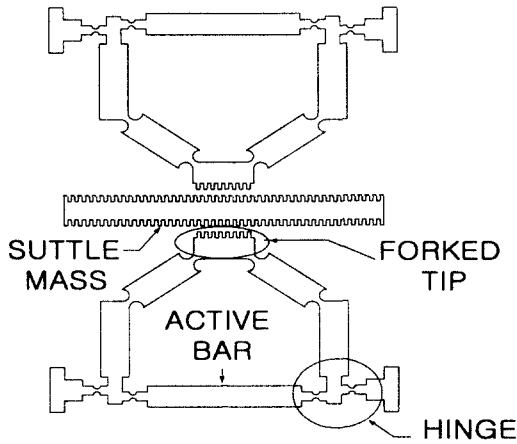


Fig.1 Schematic diagram of micro inchworm actuator using hinge structures.

### 3. Hinge 부분의 구조 및 해석

본 논문에서는 마이크로 액츄에이터의 작동에 있어서 많은 영향을 미치는 힌지 요소 중 힌지에 상하 대칭적으로 동근 모양의 노치(notch)를 주어 노치 반지름(R), 두 노치 사이의 폭(h) 및 2쌍의 노치 사이의 중심 거리(C)를 변화시키면서 그에 따른 마이크로 소자의 변형 상태 및 응력에 관한 해석을 수행하였다.

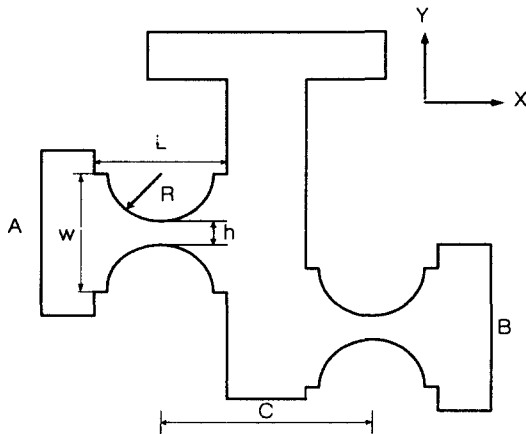


Fig.2 Schematic diagram of hinge structures.

먼저, 힌지 부분을 유한요소 해석하는데 있어서 구조물의 변형에 영향을 미치는 요소는 그림 2에서 알 수 있듯이 노치 사이의 폭(h), 노치 반지름(R), 힌지 길이(L), 힌지 폭(W), 좌우 노치 사이의 중심

거리(C)등 여러 가지 변수가 있다. 하지만 해석에 있어서 힌지의 폭(W) 및 길이(L)의 값은 8um의 고정 값으로 두고 나머지 요소들을 변화시키면서 ANSYS를 이용한 유한요소 해석을 하였으며, 해석에 있어서 구동 부분이 좌우 대칭 구조이기 때문에 액츄에이터를 반쪽만 모델링하여 해석하였다. 실제로 MEMS 소자를 제작하는데 있어서 사용된 재료는 실리콘이며, 대부분 MEMS 구조물이 50~80um 정도의 두께를 가지고 제작되기 때문에 구조물의 두께를 50um로 하여 해석을 수행하였다.

### 4. Hinge 구조의 강성

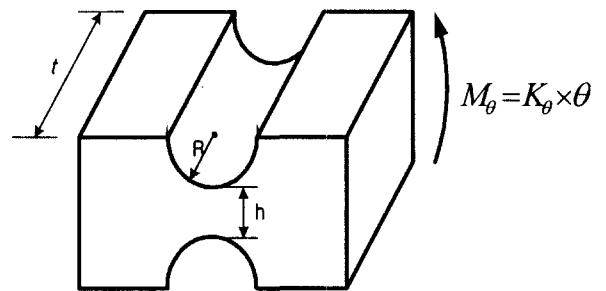


Fig.3 Parameter relationship of hinge structures.

그림 3에서 보듯이 일반적인 힌지 구조의 강성은 아래의 식(1)에서 보는 바와 같이 힌지의 두께(t), 노치 사이의 폭(h), 노치 반지름(R)이 강성에 영향을 미친다.

$$K_{\theta} = \frac{2Eth^{2.5}}{9\pi\sqrt{R}} \quad \text{----- (1)}$$

힌지의 두께가 고정된 경우, 힌지 강성은 힌지의 두께보다는 h와 R 요소에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이 힌지 구조를 이용한 인치웜 모터용 액츄에이터의 전체 응력 및 변위 크기는 힌지의 강성에 크게 영향을 받으므로 유한요소 해석에 있어서 이 두 요소의 변화 및 좌, 우 노치 사이 중심 거리(C)의 변화에 따른 MEMS 소자의 변화 양상을 해석하였다. 실제 제작된 마이크로 인치웜 모터 액츄에이터 구동은 그림 2에서 구조물의 왼쪽 부분(A)은 앵커(anchor)로 고정되어 움직이지 않으며, 오른쪽 부분(B)은 인가되는 전류에 의해 발생하는 열팽창에 때문에 -X 방향으로 0.025um의 변위가 발생한다. 그리고 구조물 전체의 강성 계산을 위해 인치웜 모터의 첨단부에 -X 방향으로 1uN 힘을 가하여 해석을 하였다.

### 5. Hinge 구조에 대한 유한요소 해석

(1) 노치 반지름(R) 변화에 따른 해석

Table.1 Comparison of stress, displacement, stiffness with respect to notch radius.

(h=2um, C=20um)

|     | -X방향 변위를 줌<br>(0.025um) |         | Forked tip에<br>Fx=-1uN을 가함 |         | 구조물<br>강성 |
|-----|-------------------------|---------|----------------------------|---------|-----------|
|     | DMX                     | SMX     | DMX                        | SMX     |           |
| R=2 | 0.258E-5                | 0.251E9 | 0.995E-6                   | 0.540E8 | 1.005     |
| R=3 | 0.263E-5                | 0.236E9 | 0.999E-6                   | 0.541E8 | 1.001     |
| R=4 | 0.271E-5                | 0.193E9 | 0.102E-5                   | 0.542E8 | 0.9806    |
| R=5 | 0.275E-5                | 0.177E9 | 0.105E-5                   | 0.541E8 | 0.9502    |
| R=6 | 0.278E-5                | 0.164E9 | 0.108E-5                   | 0.543E8 | 0.92592   |
| R=7 | 0.281E-5                | 0.163E9 | 0.119E-5                   | 0.540E8 | 0.8403    |

힌지 구조에 노치를 만들 경우, 마이크로 인치 웹 모터의 운동에서 노치 부분에 내부응력이 집중됨을 알 수 있다. 또한 노치의 반지름이 증가할수록 마이크로 인치 웹 모터의 작동 범위가 증가하고 발생하는 내부응력도 줄어들지만 구조물의 전체적인 강성이 작아지는 경향이 있다.

(2) 상,하 노치 사이 폭(h) 변화에 따른 해석

Table.2 Comparison of stress, displacement, stiffness with respect to notch width

(R=6um, C=20um)

|     | -X방향 변위를 줌<br>(0.025um) |         | Forked tip에<br>Fx=-1uN을 가함 |         | 구조물<br>강성 |
|-----|-------------------------|---------|----------------------------|---------|-----------|
|     | DMX                     | SMX     | DMX                        | SMX     |           |
| h=2 | 0.278E-5                | 0.164E9 | 0.108E-5                   | 0.543E8 | 0.9259    |
| h=3 | 0.213E-5                | 0.162E9 | 0.992E-6                   | 0.539E8 | 1.0080    |
| h=4 | 0.156E-5                | 0.135E9 | 0.923E-6                   | 0.539E8 | 1.0834    |
| h=5 | 0.116E-5                | 0.124E9 | 0.869E-6                   | 0.534E8 | 1.1507    |
| h=6 | 0.877E-6                | 0.107E9 | 0.848E-6                   | 0.539E8 | 1.1793    |
| h=7 | 0.714E-6                | 0.927E8 | 0.830E-6                   | 0.540E8 | 1.2043    |

상하 노치 사이 폭(h)의 변화에 따른 마이크로 인치 웹 모터의 운동 상태를 살펴보면, h의 변화에 따라 발생하는 구조물 변위의 변화가 노치 반지름(R)을 변화시키는 것 보다 더 크다는 것을 표 2에서 알 수 있으며, 그에 의해 발생하는 내부 응력도 상당히 감소된 값을 보여준다. 그림 4는 R, h의 변화에 따른 변위를 계산한 것으로서, 힌지 구조물을

설계하는데 있어서 노치 반지름(R)을 변화시키는 것보다는 노치 사이 폭(h)을 변화시키는 것이 더 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다.

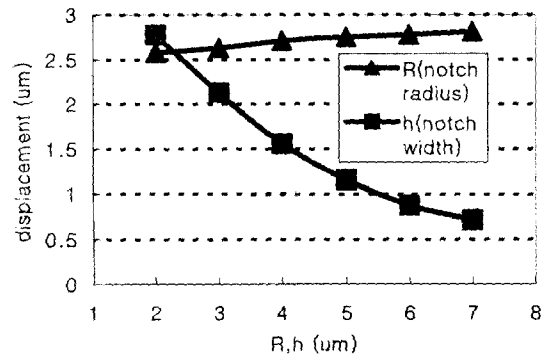


Fig.4 Estimation of displacement according to the variation of R and h.

(3) 좌, 우 노치 사이 중심 거리(C)의 변화에 따른 해석

Table.3 Comparison of stress, displacement, stiffness with respect to notch center distance.

(R=6um, h=2um)

|      | -X방향 변위를 줌<br>(0.025um) |         | Forked tip에<br>Fx=-1uN을 가함 |         | 구조물<br>강성 |
|------|-------------------------|---------|----------------------------|---------|-----------|
|      | DMX                     | SMX     | DMX                        | SMX     |           |
| C=18 | 0.284E-5                | 0.168E9 | 0.117E-5                   | 0.542E8 | 0.8547    |
| C=20 | 0.278E-5                | 0.164E9 | 0.108E-5                   | 0.543E8 | 0.9259    |
| C=22 | 0.272E-5                | 0.167E9 | 0.105E-5                   | 0.539E8 | 0.9524    |

좌, 우 노치 사이 중심 거리(C)의 변화는 위의 표 3에서 보는 바와 같이, 중심 거리 4um의 큰 변화에도 불구하고 구조물이 발생하는 변위차이는 불과 0.125um 정도 밖에 되지 않는다. 그리고 내부 응력의 관점에서는 거의 차이를 보여주지 못하므로 힌지 구조물을 설계함에 있어서 노치 간의 중심 거리(C)의 변화는 구조물 변형에서 고려하지 않고, 힌지의 중앙에 노치를 위치시키면 된다. 표 1,2,3의 해석 결과를 토대로 하여 마이크로 인치 웹 모터를 변위, 내부 응력의 관점에서 설계한다면 R=7um, h=2um, C=18um가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. 그림 5와 6은 위 설계 조건에서의 ANSYS 해석 결과로써 최대 변위(DMX)는 2.84um, 최대 응력(SMX)은 0.160E9 N/m<sup>2</sup>의 값을 나타내었으며, 표 1, 2, 3과 비교해 보면 변위와 응력의 관점에서 가장 좋은 성능 값을 나타낸다.

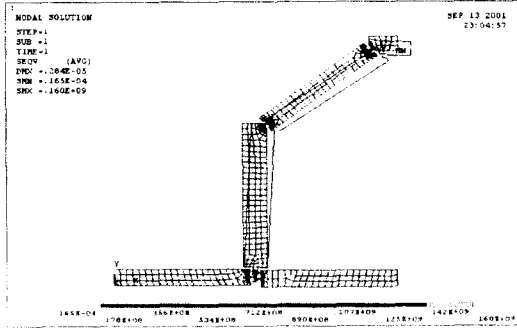


Fig.5 ANSYS analysis of micro inchworm motor using hinge structures.

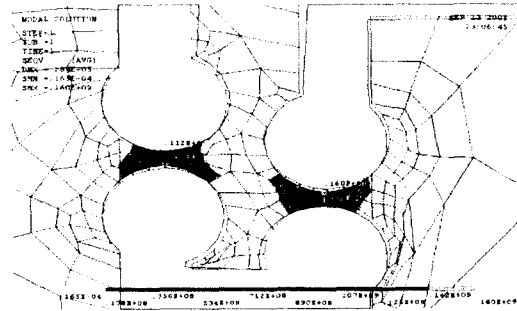


Fig.6 ANSYS analysis of hinge structures used in micro inchworm motor.

## 6. Micro inchworm actuator 의 제작

위의 결과를 바탕으로 SOI(Silicon-On-Insulator) wafer 에 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 를 이용하여, 최소 폭이 2 $\mu$ m 인 마이크로 인치웜 모터를 제작하였으며, 그림 7,8 은 제작된 액츄에이터의 힌지 부분에 대한 SEM 이미지를 보인 것이다.

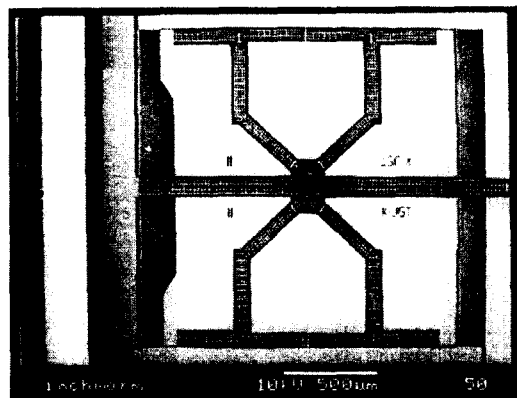


Fig.7 SEM image of micro inchworm motor.

전기적인 저항을 제어하기 위해서 phosphorus(인)으로 doping 하였으며, 마지막으로 마이크로 소자가 운동을 하는데 있어서 발생할 수 있는 고착(stiction) 문제를 해결하기 위해서 HF GPE(Gas-Phase Etching) 공정으로 희생층(silicon oxide)을 식각(etching)하여 구조물을 release 시켰다

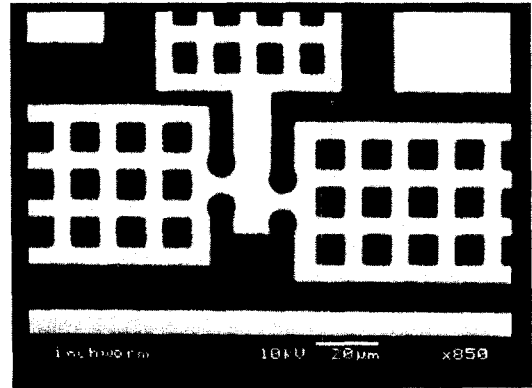


Fig.8 SEM image of hinge used in micro inchworm motor.

## 7. 결론

힌지를 이용한 마이크로 인치웜 모터 액츄에이터의 변형 범위는 힌지 구조의 형태에 크게 좌우된다. 본 논문에서는 구동 범위를 증대시키기 위해 힌지 상하 부분에 노치를 주고, 지렛대 모양으로 설계, 제작하였다. 구조물의 구동 범위는 노치 반지름(R), 노치 사이의 폭(h) 등에 많은 영향을 받으며, 해석 결과에서 알 수 있듯이 변위, 응력의 관점에서 노치 반지름(R) 보다는 노치 사이의 폭(h)이 더 중요한 변수가 된다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 연구지원 사업과 교육부 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. Neukermans, A, Ramaswami, R, "MEMS technology for optical networking applications", IEEE. Volume 39, pp. 62-69, 2001.
2. Honam Kwon, Jong Hyun Lee, Sung Ho Jeong, Sun Kyu Lee, Won Ick Jang and Chang Auck Choi, "A Micromachined Thermoelastic Actuator with 2-Dimensional Motion for Inchworm Motor Application", 32<sup>nd</sup> ISR . pp.796-801,2001.
3. Isao Shimoyama, Osamu and Hirofumi Miura, "3D Micro-structures Folded by Lorentz Force.", International MEMS, pp.24-28, 1998.