

마이크로 액추에이터의 실제 거동에 대한 FEA 시뮬레이션

이양창*, 이준성#

FEA Simulation for Practical Behaviors of Electrostatic Micro Actuator

Yang Chang Lee*, Joon Seong Lee #

ABSTRACT

Micromachines are extremely novel artifacts with a variety of special characteristics. Utilizing their tiny dimensions ranging roughly from 10 to 10^3 micro-meters, the micromachines can perform tasks in a revolutionary manner that would be impossible for conventional artifacts. Micromachines are in general related to various coupled physical phenomena. They are required to be evaluated and designed considering the coupled phenomena. This paper describes finite element analysis (FEA) simulation of practical behaviors for the micro actuator. Especially, electric field modeling in micro actuators has been generally restricted to in-plane two-dimensional finite element analysis because of the complexity of the micro actuator geometry. However, in this paper, the actual three-dimensional geometry of the micro actuator is considered. The starting torque obtained from the in-plane two-dimensional analytical solutions were compared with that of the actual three-dimensional FE analysis results. The starting torque is proportional to V^2 , and that the two-dimensional analytical solutions are larger than the three-dimensional FE ones. It is found that the evaluation of micro actuator has to be considered electrical leakage phenomenon.

Key Words : Finite Element Analysis(유한요소해석), Micro Actuator(마이크로 액추에이터), Electrostatic Analysis(정전장해석), Starting Torque(시작토크)

1. 서론

반도체 제조기술을 이용하여 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 즉, 초소형 기계부품의 설계, 제조 기술이 미래 첨단기술로 부각되어 기계공학의 새로운 분야로 정착을 해 가고 있다. 마이크로머신 시스템에서 중추적인 역할을 하는 정전 액추에이터의 해석은 복합현상을 다루어야 하는 어려움 때문에 아직까지는 주로 2 차원적으로

해석하고 있다.¹ 3 차원적인 수치 및 실험평가는 실용적인 문제의 중요성에 비추어 볼 때 별로 발표된 바 없고, 일상적인 설계에 적용시킬 수 있는 수준에 이르지 못하였다.² 따라서 본 논문에서는 마이크로 액추에이터의 설계를 위한 초기단계로, 센서로서의 역할을 하는 정전 액추에이터에 대한 3 차원 유한요소해석(FEA)을 통한 시뮬레이션을 수행하였다.³ 특히, 변형해석과 정전장해석을 통하여 액추에이터의 회전각과 구동에 필요한 전압을

접수일: 2004년 3월 29일; 게재승인일: 2004년 10월 7일

* 경기대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 경기대학교 기계시스템디자인공학부

E-mail : jslee1@kyonggi.ac.kr Tel. (031)249-9813

유추하여 미세 회전운동을 분석하였다.

2. 마이크로 정전 액추에이터

본 연구에서 적용한 액추에이터는 마이크로 모터와 같이 정전력을 이용하여 구동하게 되며, 위치제어를 하는 센서로서 사용된다.⁴ 제조과정 역시 동일한 실리콘의 반도체 가공에 의해 제작될 수 있다. 마이크로 액추에이터의 구조를 Fig. 1(a)에 나타냈으며, 움직이는 회전자(rotor)와 그 주위의 전극(electrode), 즉 고정자(stator)로 구성된다. 각 전극에 연차적으로 전압이 공급됨에 따라 고정된 중심부로 인한 약간의 비틀림을 유발하며, 회전자는 전극 주위를 움직이게 된다. 회전자와 전극사이에 유발되는 정전력의 힘에 의해 구동력이 발생하는 것이다. 이러한 운동의 묘사를 Fig. 1 (b)에 나타내었다.

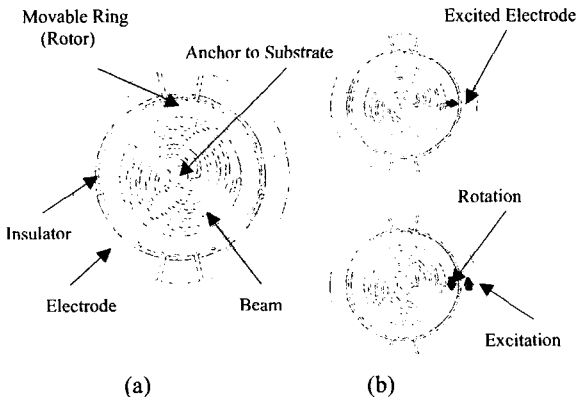


Fig.1 Structure and motion of micro actuator

본 연구에서는 마이크로 정전 액추에이터의 설계를 위한 토대를 마련하고자 2 차원적인 해석적인 방법⁵에 의한 시작토크(starting torque)를 계산하였다.

3. 시작토크의 해석적 계산⁵

Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 절연층에 의해 분리된 2 개의 평판을 가로질러 전압 V 를 인가하였다고 하자. 이 때 콘덴서의 포텐셜에너지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

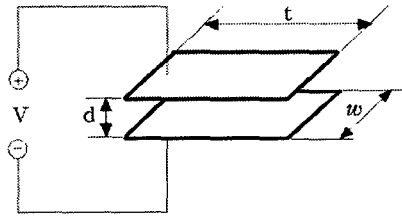


Fig. 2 Parallel plate capacitor

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{\epsilon_0 w t V^2}{2d} \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 유전체 상수이다.

이 평판에 대한 식을 본 연구의 액추에이터에 적용시키는 경우, w 는 전극의 폭, t 는 전극의 두께, V 는 인가전압, d 는 회전자와 고정자(전극)사이의 거리에 해당한다. 이 액추에이터에 수반되는 토르크, τ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{dU}{d\phi} \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 회전자의 회전각을 나타내는 것으로 전극의 중심각 θ 와 함께 Fig. 3 에 나타내었다. 따라서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있으며, 토르크는 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

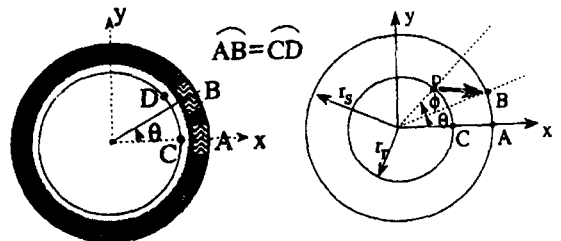


Fig. 3 Motion of the micro actuator

$$r_r(\theta + \phi) = r_s \theta \quad (3)$$

$$\frac{\theta}{\phi} = \frac{r_r}{r_s - r_r} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{dU}{d\phi} = \frac{dU}{d\theta} \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{dU}{d\theta} \frac{r_r}{r_s - r_r} \quad (5)$$

토크 τ 를 식 (5)를 이용하여 계산하기 위해서는 전극과 회전자 사이의 정전 포텐셜에너지를 계산하여야 한다. Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 전극의 폭을 w , 구동되는 전극의 각을 각각 θ_s, θ_e 라 할 경우, 회전자와 전극 사이의 공간은 일정하지 않게 되므로 이 증분 에너지 dU 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$dU = \frac{\epsilon_0 t V^2}{2d} dw = \frac{\epsilon_0 t V^2}{2d} r_s d\theta \quad (6)$$

여기서 $dw = r_s d\theta$ 는 전극을 따라 증가하는 길이이다.

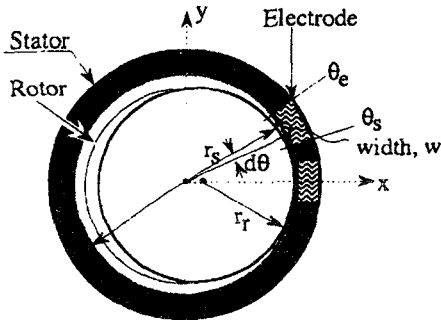


Fig. 4 The electrode of width, w and thickness, t , is broken into elements $r_s d\theta$ in order to integrate for total electrostatic energy

따라서, 전체 에너지 U 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 결과적으로 식 (8)을 이용하여 시작 토크를 계산할 수 있다.

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dU = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\epsilon_0 t V^2}{2d} dw = \frac{\epsilon_0 t V^2 r_s}{2d} d\theta \quad (7)$$

$$\tau = \frac{dU}{d\theta} \frac{r_r}{(r_s - r_r)} = \left[\frac{r_r}{r_s - r_r} \right] \frac{d}{d\theta} \left[\frac{\epsilon_0 t V^2 r_s}{2} \right] \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{d} d\theta$$

$$= \left[\frac{r_r}{r_s - r_r} \right] \left[\frac{\epsilon_0 t V^2 r_s}{2} \right] \left(\frac{1}{d} \Big|_{\theta_1} - \frac{1}{d} \Big|_{\theta_2} \right) \quad (8)$$

4. FEA 시뮬레이션

4.1 FEA 모델

본 연구에서 적용한 마이크로 액추에이터의 실제적인 구동을 묘사하기 위해서는 자중에 의한 해석, 모드해석, 그리고 변형해석 및 정전장 해석 등 여러 가지 해석을 필요로 한다. 마이크로 정전 액추에이터를 설계하기 위해 본 연구에서는 초기 단계로서 Fig. 5 와 같은 3 가지 형상에 따른 미세 회전운동을 분석하고자 (a) 자중에 의한 변형해석, (b) 모드해석, (c) 구동 시 회전자의 움직임에 따른 변형해석, (d) 전자장해석을 수행하였다. 액추에이터의 유한요소해석은 범용 해석코드인 ANSYS 를 이용하였으며 요소는 8 노드 3 차원 사각요소(solid brick element 45)를 사용하였다. Fig. 5 에 각 형상에 대한 유한요소 모델을 나타내었으며, 해석에 사용된 액추에이터의 치수 및 재료물성치는 Table 1, Table2 에 나타내었다.

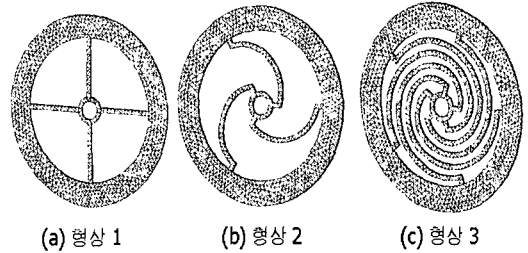


Fig. 5 Geometry model and FE mesh of rotors

Table 1 Reference dimensions

Diameter of plane ring	420 μm
Thickness of plane ring	320 μm
Inner diameter of electrodes	430 μm
Thickness of spoke beams	5 μm
Width of spoke beams	10 μm
Thickness of insulator	1 μm

Table 2 Material properties

Material	Si
Young's modulus	190 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	7 GPa
Mass density	2300 kg/m ³

4.2 자중에 의한 변형해석

본 해석에서는 회전자의 자중에 의한 변형해석으로 처짐량을 구하였다. Fig. 6 은 자중에 의한 회전자의 처짐을 나타낸 것으로, 최대 처짐량은 (a)형상 1 의 경우는 0.00772 μm , (b)형상 2 의 경우는 0.0271 μm , (c)형상 3 의 경우는 0.0694 μm 로 계산되었다. 이 값은 회전자의 두께가 5 μm 이므로, 자중에 의한 처짐 현상은 본 마이크로 액추에이터의 설계시 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다.



Fig. 6 Out-of-plane deformation of rotor

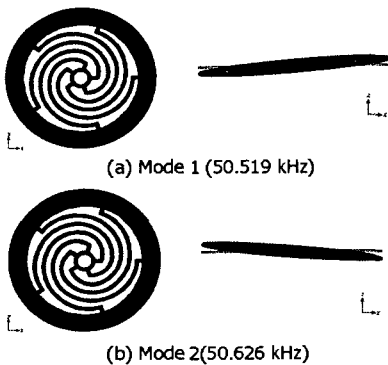


Fig. 7 Calculated first and second eigen modes of rotor

4.3 Mode 해석

회전자의 Mode 분석은 기계류에 쓰이는 것처럼 동적인 실행작업을 하기 위한 것이다. 고유진동수와 함께 계산되어진 Mode 해석의 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 1 차 Mode 의 고유진동수는 50.519 kHz 이고 2 차 Mode 의 고유진동수는 50.626

kHz 이다. 해석결과 정전 마이크로 액추에이터의 공진을 피하기 위한 최저 요구치인 10kHz 를 만족하였다.⁶

4.4 회전자의 움직임에 따른 변형해석

본 해석은 재료의 탄성한계 내에서 회전자의 회전각(θ)과 회전자가 움직이기 위해 필요로 하는 토크와의 관계를 정량적으로 분석한 것이다. Fig. 8 에 본 해석에 적용된 경계조건을 나타내었다. 회전자는 전극의 내부 표면을 따라 회전하기 때문에 전극간 원주길이나 회전자의 원주길이가 같도록 강제변위 조건을 사용하였다. 또한, 전극은 회전자 재료보다 아주 강하기 때문에 전극의 변형은 무시하였다. 최대응력이 실리콘 Si 의 탄성한계인 7GPa 에 도달할 때까지 경계조건을 바꾸어 가면서 형상별 변형해석을 반복적으로 수행하였다.

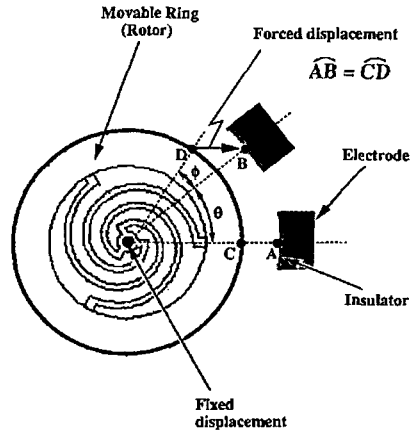


Fig. 8 Boundary conditions for in-plane deformation analysis of rotor

해석결과와 한 예로 탄성한계에 근접했을 때의 상당응력 분포를 Fig. 9 에 나타내었다. 쉽게 예상할 수 있듯이, 회전자 자체는 큰 변형이 없었으나 빔의 연결 부위에서 최대응력이 나타났다. 연결부의 상세한 형상은 응력집중을 피하기 위한 모양으로 바뀌어야 되리라 생각된다. 탄성한계내에서 각각의 형상별 가능한 회전각과 시작토크는 다음과 같다.

- 1)형상 1 ▶ 시작토크: 2.99×10^{-14} N· mm, 최대회전각 : 3.43°
- 2)형상 2 ▶ 시작토크: 2.19×10^{-14} N· mm, 최대회전각 : 10.29°
- 3)형상 3 ▶ 시작토크: 3.75×10^{-14} N· mm, 최대회전각 : 44.58°

위의 해석결과 중 시작토크의 값은 다음절의 정전장 해석의 결과와 연계하여 구동에 필요로 하는 전압을 유추하는데 사용된다.

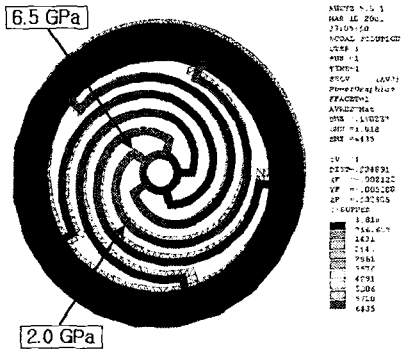


Fig. 9 Calculated distribution of equivalent stress

4.5 정전장 해석

일반적으로 마이크로 액추에이터의 성능을 평가하기 위해서는 작동장치의 기하학적인 복잡성 때문에 주로 2 차원적인 해석이 수행된다.¹⁷ 본 연구에서 사용된 형상의 치수를 2 장에 설명된 계산식에 적용하여 얻어진 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 시작토크는 전압 V^2 에 비례함을 알 수 있다. 계산식에 의한 시작토크는 평판과 같은 전기적인 누설이 전혀 없다는 가정하에서 얻어진 것이다. 본 해석에서는 전기적인 누설현상을 고려하기 위하여 마이크로 액추에이터의 실제적인 3 차원 형상을 고려하였다. Fig. 11 은 회전자와 고정자사이의 공기 gap 에 대한 기하학적 형상 및 해석에 대한 경계조건을 나타낸 것이다. 여기서 무한대의 경계조건을 고려하기 위하여 공기의 큰 영역을 설정하였다. 정전장 해석을 통하여 얻은 결과 값을 이용하여 시작토크를 계산하는 과정을 나타내었다.

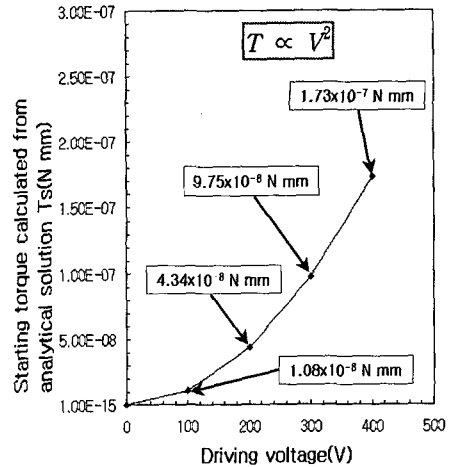


Fig. 10 Calculated starting torque vs. driving voltage using analytical equation

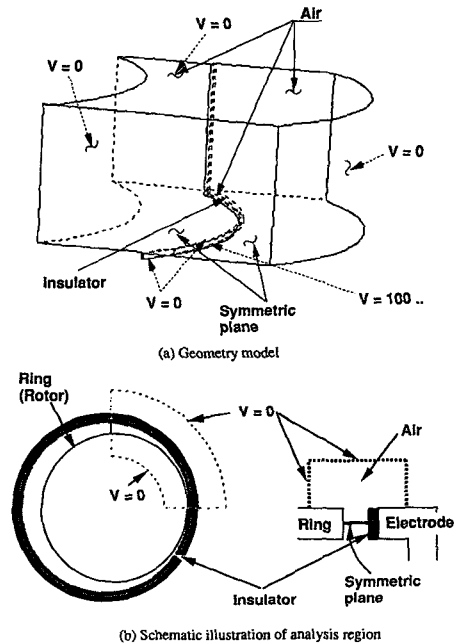


Fig. 11 Geometry model and boundary conditions for air gap between rotor and one of electrodes

재료물성치로는 공기의 유전율 8.854×10^{-12} C/Vm 을 사용하였다. Fig. 12 는 해석에 사용된 공기의 유한요소 모델과 해석결과인 전기적 포텐셜의 분포를 나타낸 것이다. 요소는 정전장해석에 사용되는 3D 요소(brick 122)이며, 12, 413 개의 노드와

7,407 개의 요소가 사용되었다. 여러 전극 중 구동에 해당하는 전극에 전압이 가해질 때, 회전자가 정전력에 의해 끌리게 되어 전극 안의 표면에 절연체와 접촉할 것이다. 또한, 처음 전극에 전압을 제거하고 다음 전극에 전압을 공급함에 따라 회전자는 공급된 전극쪽으로 움직이게 된다. 따라서 이 순간에 포텐셜에너지가 저장된다. 구동전압에 따른 시작토크의 관계를 Fig. 13 에 나타내었다. 3 차원 해석결과 역시 전압의 제곱에 비례함을 알 수 있으나 2 장의 해석적으로 얻어진 수식에 의한 결과와 비교하면 큰 차이를 보이고 있다. 이는 2 차원 적인 이론식에 의한 결과는 전기적인 누설현상이 고려되지 않았기 때문이다. 전 절에서 얻어진 시작토크의 값과 연계하면 구동에 필요한 전압을 유추해 낼 수 있다. 즉 형상 1 의 경우는 실선으로 200V 가 요구되며, 형상 2 의 경우는 점선으로 170V 가 요구됨을 알 수 있다. 또한, 형상 3 의 마이크로 액추에이터가 구동하기 위해서는 이 점쇄선으로 표시된 220V 의 전압이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

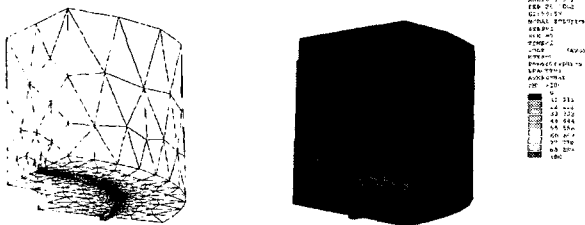


Fig. 12 FE mesh for electrostatic analysis & calculated electric potential distribution

5. 결론

마이크로 액추에이터의 설계를 위한 초기단계로서 3 차원 유한요소 해석을 수행하여 액추에이터의 미세 회전운동을 모사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마이크로 액추에이터의 자중에 의한 처짐은 아주 미소한 양으로 설계시 고려하지 않아도 되는 인자임을 알 수 있었다.
- (2) 마이크로 액추에이터의 형상에 따른 Mode 해석결과, 고유진동수의 최저 요구치인 10kHz 를 모두 만족하였다.

- (3) 액추에이터의 형상에 따른 회전자의 변형해석을 수행하여 시작토크와 탄성한계까지의 위치제어에 필요한 회전각을 구하였다.
- (4) 정전장 해석을 통하여 시작토크는 전압 V^2 에 비례함을 알 수 있었다. 또한, 변형해석의 결과와 연계하여 형상별 구동에 필요한 전압을 유추하였다.

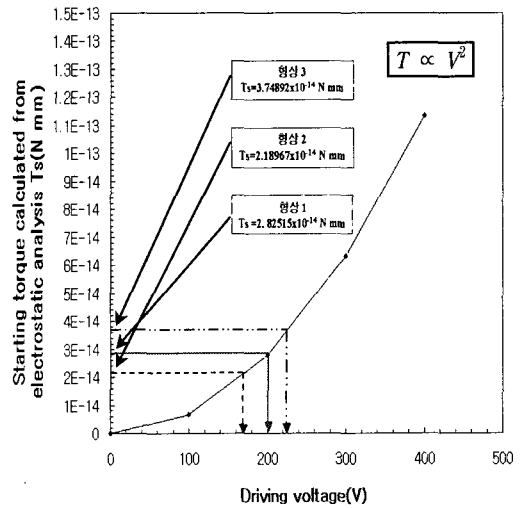


Fig. 13 Calculated starting torque vs. driving voltage

참고문헌

1. Gilbert, J. R., Harris, P. M., Ouma, D.O., Cai, X., Pfajfer, A., White, J. and Senturia, S. D., "Implementation of a MEMCAD System for Electrostatic and Mechanical Analysis of Complex Structures from Mask Descriptions," Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, pp. 207-212, 1993.
2. Nakajima, N. "Micromachines as Intelligent Artifacts," Proceedings of the 1st International Symposium on Research into Artifacts, Tokyo, pp. 48-51, 1993.
3. Lee, Y. C. and Lee, J. S., "FEA Simulation for Performance Estimation of Micro Actuator," Proceedings of the KSPE Conference, Seoul, pp. 1045-1048, 2002.
4. Buratynski, E. K., "A Fully Automatic Three-

- Dimensional Mesh Generator for Complex Geometries,” *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 931-952, 1990.
5. Hirano, T., Furuhashi, T., Gabriel, K.J. and Fujita, H., “Design, Fabrication and Operation of Submicron Gap Comb-Drive Microactuators,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 52-59, 1993.
 6. Lee, J. S., “Automated CAE System for Three-Dimensional Complex Geometry,” *Doctoral Thesis*, The University of Tokyo, 1995.
 7. Oh, S. J., Kim, H. M., Choi, H. R., Jeon, J. W. and Nam, J. D., “Development of Fuzzy Control and Modeling of IPMC Actuator for the Endoscopic Microcapsule,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 39-48, 2003.