

마이크로 액추에이터의 성능평가를 위한 FEA 시뮬레이션

이양창*(대림대학 산학관리지원팀), 이준성(경기대학교 기계공학과)

FEA Simulation for Performance Estimation of Micro Actuator

Y. C. Lee(Daelim College), J. S. LEE(Dept. of Mechanical Eng. Kyonggi Univ.)

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 thesis, 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), Micromachine(마이크로머신), Starting Torque(시작토크), Micro Actuator(마이크로 액추에이터)

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. 따라서 본 논문에서는 마이크로 액추에이터의 설계를 위한 초기단계로, 센서로서의 역할을 하는 정전 액추에이터에 대한 3 차원 유한요소해석(FEA)을 통한 시뮬레이션을 수행하였다. 특히,

변형해석과 정전장해석을 통하여 액추에이터의 회전각과 구동에 필요한 전압을 유추하여 미세 회전 운동을 분석하였다.

2. 마이크로 정전 액추에이터

본 연구에서 적용한 액추에이터는 마이크로 모터와 같이 정전력을 이용하여 구동하게 되며, 위치 제어를 하는 센서로서 사용된다⁽²⁻⁶⁾. 제조과정 역시 동일한 실리콘의 반도체 가공에 의해 제작될 수 있다. 마이크로 액추에이터의 구조를 Fig. 1에 나타냈으며, 움직이는 회전자(rotor)와 그 주위의 전극(electrode), 즉 고정자(stator)로 구성된다. 각 전극에 연차적으로 전압이 공급됨에 따라 고정된 중심부로부터 약간의 비틀림을 유발하며, 회전자는 전극 주위를 움직이게 된다. 회전자와 전극사이에 유발되

는 정전력의 힘에 의해 구동력이 발생하는 것이다. 이러한 운동의 묘사를 Fig. 2 에 나타내었다. 본 해석에서 사용한 마이크로 액추에이터의 치수 및 사용된 실리콘 재료의 물성치는 Table 1 과 Table 2 와 같다.

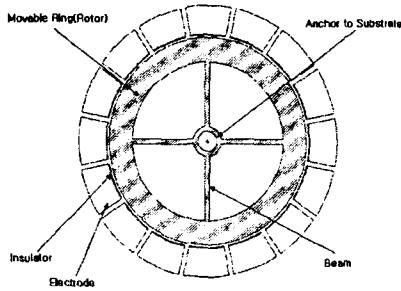


Fig. 1 Structure of micro actuator

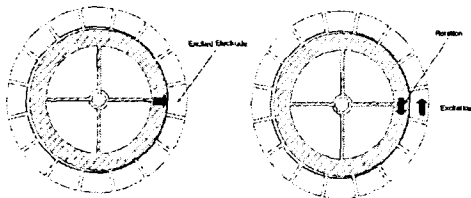


Fig. 2 Motion of electrostatic micro actuator

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 modules	190 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	7 GPa
Mass density	2300 kg/m^3

3. FEA 시뮬레이션

본 연구에서 적용한 마이크로 액추에이터의 실

제적인 구동을 묘사하기 위해서는 자중에 의한 해석, 모드해석, 그리고 변형해석 및 정전장 해석 등 여러 가지 해석을 필요로 한다.

3.1 FEA 모델

마이크로 정전 액추에이터를 설계하기 위해 본 연구에서는 초기단계로서 3 가지 형상에 따른 각각의 미세 회전운동을 분석하고자 구동 시 회전자의 움직임에 따른 변형해석 및 정전장해석을 수행하였다. 특히, 두 해석의 결과로 구동에 필요한 전압을 유추하였다. 액추에이터의 유한요소해석은 범용 해석코드인 ANSYS⁽⁷⁾를 이용하였으며 요소는 8 노드 3 차원 사각요소(solid brick element 45)를 사용하였다. 각 형상에 따른 FE 모델을 Fig. 3 에 나타내었다.

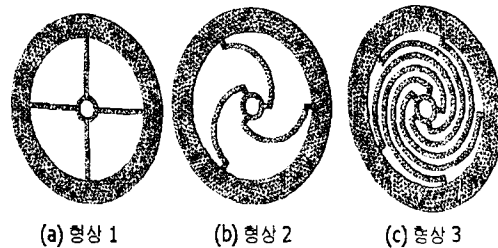


Fig. 3 FE model of micro actuator

3.2 회전자의 움직임에 따른 변형해석

본 해석은 재료의 탄성한계 내에서 회전자의 회전각(θ)과 회전자가 움직이기 위해 필요로 하는 토크와의 관계를 정량적으로 분석한 것이다. Fig. 4 에 본 해석에 적용된 경계조건을 나타내었다. 회전자는 전극의 내부 표면을 따라 회전하기 때문에 전극간 원주길이가 회전자의 원주길이가 같도록 강제변위 조건을 사용하였다. 또한, 전극은 회전자 재료보다 아주 강하기 때문에 전극의 변형은 무시하였다. 최대응력이 실리콘 Si의 탄성한계인 7GPa에 도달할 때까지 경계조건을 바꾸어 가면서 형상별 변형해석을 반복적으로 수행하였다. 해석 후 반력(reaction force)을 이용, 토크를 계산하였으며 형상별 탄성한계에 도달할 때까지의 회전각을 구하였다. 하나의 예로써 형상 3에 대한 상당응력 분포는 Fig. 5 와 같다. 쉽게 예상할 수 있듯이, 회전자 자체는 큰 변형이 없었으나 빔의 연결 부위에서 최대응력이 나타났다. 또한, 탄성한계내에서의 가능한 최대 회전각과 시작토크는 Table 3 에 나타내었다.

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

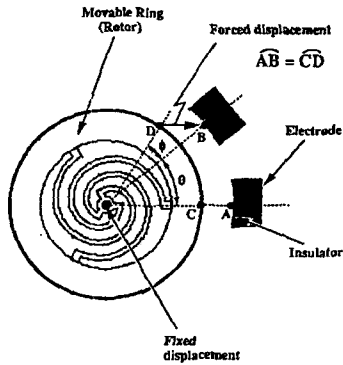


Fig. 4 Boundary conditions for in-plane deformation analysis of rotor

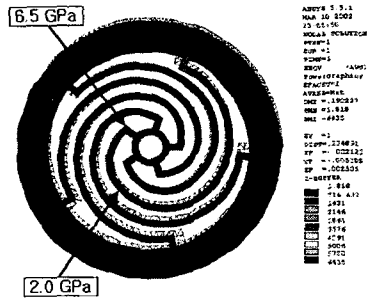


Fig. 5 Calculated distribution of equivalent stress

Table 3 Starting torque and maximum rotation angle

	Starting torque (N·mm)	Maximum rotation angle(deg.)
형상 1	2.99×10^{-14}	3.43
형상 2	2.19×10^{-14}	10.29
형상 3	3.75×10^{-14}	44.58

3.3 정전장 해석

일반적으로 마이크로 액추에이터의 성능을 평가하기 위해서는 작동장치의 기하학적인 복잡성 때문에 주로 2 차원적인 해석이 수행된다. 본 연구에서 사용된 형상의 치수를 이론식⁽⁸⁾에 적용하여 계산된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시작토크는 전압 V^2 에 비례함을 알 수 있다. 이론식에 의한 시작토크는 정전장의 누설이 전혀 없다는 가정하에서 얻어진 것이다. 본 해석에서는 정전장의 누설현상을 고려하기 위하여 액추에이터의 실제적인 3 차원 형상을 고려하였다.

Fig. 7은 회전자와 고정자사이의 공기 gap에 대한 기하학적 형상 및 해석에 사용된 경계조건을 나

타낸 것이다. 여기서 무한대의 경계조건을 고려하기 위하여 공기의 큰 영역을 설정하였다. 재료물성치로는 공기의 유전율 $8.854 \times 10^{-12} \text{ C/Vm}$ 를 사용하였다.

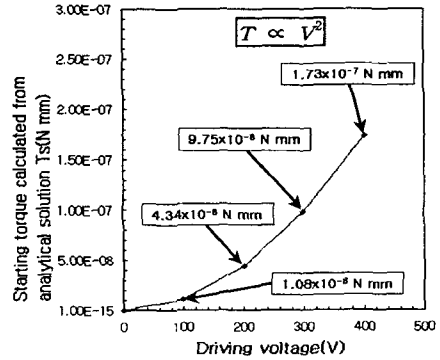


Fig. 6 Calculated starting torque vs. driving voltage

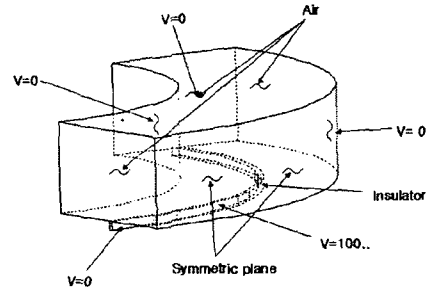


Fig. 7 Geometry model and boundary conditions for air gap between rotor and one of electrodes

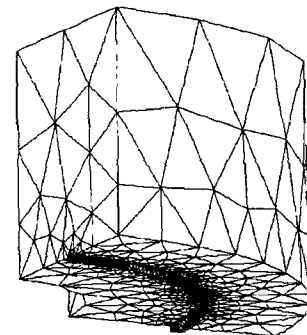


Fig. 8 FE mesh for electrostatic analysis

Fig. 8 은 본 해석에 사용된 FE 모델을 나타낸 것으로 12,413 개의 노드와 7,407 개의 요소가 사용되었다. 여러 전극 중 구동에 해당하는 전극에 전압이 가해질 때, 회전자가 정전력에 의해 끌리게 되어 전극내부의 절연체와 접촉할 것이다. 또한, 인가된 전극의 전압을 제거하고 다음 전극에 전압을 공급함에 따라 회전자는 공급된 전극쪽으로 움직이게 된다. 구동전압에 따른 시작토크의 관계를 Fig. 9 에 나타내었다. 3 차원 해석결과 역시 전압의 제곱에 비례함을 알 수 있으나, 2 차원 해석해의 결과와는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 정전장의 누설현상때문으로 생각된다.

변형해석에서 얻어진 시작토크의 값과 연계하면 구동에 필요한 전압을 유추해 낼 수 있다. 즉 형상 1 의 경우는 실선으로 200 V 가 요구되며, 형상 2 의 경우는 점선으로 170 V 가 요구됨을 알 수 있다. 또한, 형상 3 의 마이크로 액추에이터가 구동하기 위해서는 이점쇄선으로 표시된 220 V 의 전압이 필요하다는 것을 알 수 있다.

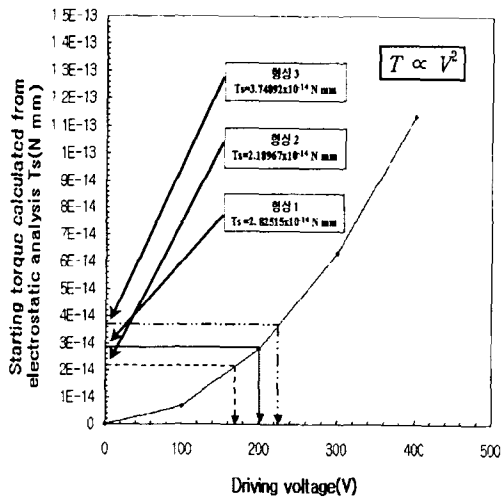


Fig. 9 Calculated starting torque vs. driving voltage

4. 결론

마이크로 액추에이터의 설계를 위한 초기단계로서 3 차원 유한요소 해석을 수행하여 액추에이터의 미세 회전운동을 모사하였다. 특히, 액추에이터의 형상에 따른 회전자의 변형해석을 수행하여 시작토크와 탄성한계까지의 위치제어에 필요한 회전각을 구하였다. 또한, 정전장 해석을 통하여 시작토크는 전압 V^2 에 비례함을 알 수 있었으며 변형해석의 결과와 연계하여 형상별 구동에 필요한 전압을 유추하였다.

[1] Hirano, T., Furuhashi, T., Gabriel, 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, 1992.

[2] Crary, S., Juma, O. and Zhang, Y., "Software Tools for Designers of Sensor and Actuator CAE Systems, IEEE Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, CA, U.S.A., pp. 498-501, 1991.

[3] Chang-Jin Kim, "Micromachining Technologies of MEMS", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 499-514, 1995.

[4] Fukuda, T. and Tanaka, T., "New Mechanism and Dynamic Control Method of Electrostatic Actuator with Three Degrees of Freedom", Proceeding of the 1991 IEEE, International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California-April, pp. 1610-1615, 1991.

[5] Flynn, A.M., Tavrow, L.S., Bart, S.F., Brooks, R.A., Ehrlich, D.J., Udayakumar, K.R. and Cross, L.E., "Piezoelectric Micromotors for Microrobots, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 44-51, 1992.

[6] Bart, S.F., Tavrow, L.S., Lang, J.H. and Senturia, S.D., "Electric Micromotor Dynamics, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 39, No. 3, pp. 566-575, 1992.

[7] Moaveni, S., "Finite Element Analysis : Theory and Application with ANSYS", Pearson Education Korea, 2001.

[8] Lee, Joon-Seong, "Automated CAE System for Three-Dimensional Complex Geometry", Doctoral Thesis, The University of Tokyo, 1995.