유한요소해석을 이용한 마이크로 액추에이터의 설계

이양창*, 이준성**
*대림대학 기계과
***경기대학교 기계시스템공학과
e-mail:yclee@daelim.ac.kr

Design of Micro Actuator Using Finite Element Analysis

Yang-Chang Lee*, Joon-Seong Lee**
*Dept of Industry Academic Cooperation, DaeLim College
**Dept of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

요 약

본 논문은 미세구조의 마이크로 액추에이터의 구동해석을 위한 결과로써 3차원 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 수행하였다. 마이크로머신과 같은 미소구조물을 해석하는 경우, 컴퓨터의 메인 프로세스에 비해 프리프로세서(pre-processor)의 비중이 높아지고 있어 그 효율화가 가장 중요하다. 수작업에 의존해야 했던 지난날의 요소분할법 기술은 최근에 들어 여러 연구자들에 의해 개발되고 있다. 특히, 복합현상을 다루는 정전 액추에이터에 직접적인 적용에 다소 어려움이 있는데 3차원적인 수치 및 실험평가는 실용적인 문제에서 비추어 볼 때 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 센서로서의 역할을 하는 마이크로 정전 액추에이터의 기본설계를 위한 토대를 구축하고자 3차원적인 FEA 시뮬레이션을 수행하여 미세 회전운동을 분석하였다. 그 결과 설계된 모델에서 먼저 자중해석과 Mode 해석에서 기준치를 모두 만족하였다. 또한 설계된 액추에이터의 형상에 따른 회전자의 변형해석을 수행하여 시작토오크와 탄성한계까지의 위치제어에 필요한 회전각을 구하였으며, 정전장 해석을 통하여 시작토오크는 전압 V^2에 비례함을 알 수 있었다

1. 서론

최근 컴퓨터의 성능이 급속도로 발달, 보급됨에 따라 3차원 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)이 설계분야에서 많이 이용되게 되었다. 마이크로머신과 같은 미소구조물을 해석하는 경우, 메인 프로세스에 비해 프리프로세서(pre-processor)의 비중이 높아지고 있어 그 효율화가 가장 큰 과제로 남게 되었다. 특히, 수작업에 의존해야 했던 지난날의 요소분할법 기술은 최근에 들어 여러 연구자들에 의해 개발되고 있다[1~6]. 현재 많은 연구로 요소분할법 기술은 마이크로머신에 적용시킬 경우 제한조건이 있다. 특히, 복합현상을 다루는 정전 액추에이터에 직접적인 적용이 다소 어려움이 있다. 정전장을 취급하는 액추에이터의 3차원 모델링과 경계조건의 복잡성 때문에 주로 2차원적으로 해석하고 있다. 그러나 3차원적인 수치 및 실험평가는 실용적인 문제에서 비추어 볼 때 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 센서로서의 역할을 하는 마이크로 정전 액추에이터의 기본설계를 위한 토대를 구축하고자 3차원적인 FEA 시뮬레이션을 수행하여 미세 회전운동을 분석하였다.

2. 정전기적 구동

1mm 이내의 마이크로 크기에서 정전기적 구동장치의 이점은 여러 가지가 있다. 먼저 얇은 절연층이 두꺼운 층보다 더 높은 전계의 강도(electric field intensity)를 견디어 낸다. 양질의 얇은 절연층은 실리콘 공정에서 쉽게 얻어지며 대기 중에서의 파손이 340V 이하에서는 발생하지 않는다. 그리고 정전력은 표면력으로 작은 크기 안에서 스케일링법칙(scaling law)을 잘 따른다. 전계는 전극사이에서 한정시킬 수 있는 반면, 전자기력은 물체 전체에 작용하는 힘이고, 큰 자계를 생성하기 위해서는 적지 않은 암페어 회수(ampere-turns)가 필요하다. 정전 액추에이터는 본질적으로 전압에 의해 구동된다. 따라서 전압에 의한 개폐 작동(voltage switching)은 일반적인 스위치

의 개폐작동보다 훨씬 쉽고 빠르다. 정전기 구동장치는 실리콘 마이크로가공에 적합하다. 이는 절연체에 의해 나누어진 두 개의 얇은 전극이 필요하기 때문에 실리콘 장치를 위한 제조과정은 미세구조와 전극을 만드는데 적용시킬 수 있다. 실리콘의 무게는 가볍다. 왜냐하면 자기적 경로(magnetic path)를 위한 철과 같은 특별한 금속이 도체나 절연체를 위해서 쓰여지지 않기 때문이다.

3. 정전장 이론과 회전형 액추에이터

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 절연층에 의해 분리된 2개의 평판을 가로질러 전압 V를 인가하였을 때 콘덴서의 포텐셜에너지는 식 (1.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U=\frac{1}{2}CV^2=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 wtV^2}{2d} \qquad (1.1)$$

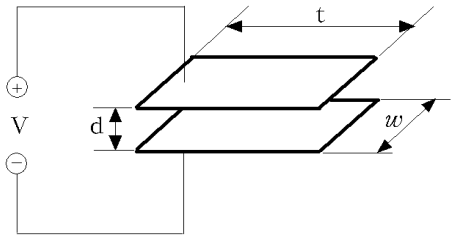
w방향으로의 변위에 의한 평판이 재배열하려고 하는 힘의 크기는 다음 식 (1.2)과 같다.

$$F_w=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 tV^2}{2d} \qquad (1.2)$$

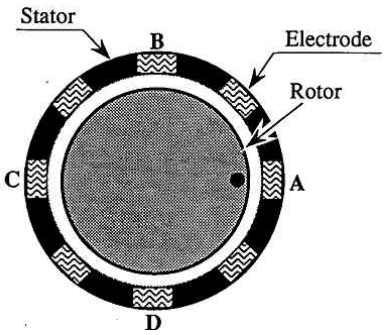
또한, 고정자와 회전자를 서로 밀착시키는 힘의 크기는 식 (1.3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이것은 선형 및 회전형 정전장 모터에서 활용되는 조절력(aligning force)이다.

$$F_d=-\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 wtV^2}{d^2} \qquad (1.3)$$

따라서 얇은 두께에도 불구하고 면적의 크기에 따라 저장되는 에너지 U를 조절할 수 있다. 그리고 해석을 위한 회전형 정전 모터의 작동 예를 Fig. 2에 나타내었다. 고정자 주위의 전극에 전압을 가함에 따라 회전자는(rotor)는 정전력으로 끌리어 고정자 안에서 움직이게 된다. 처음에 전극 A에 전압을 가하면 회전자는 A지점으로 이동되고, 다음에 B에 전압을 가하면 B지점으로 이동되는 형태로 움직이게 된다. 계속해서 C, D, A의 순차적인 전압을 가함에 따라 최초상태의 회전자 위치가 바뀌었음을 알 수 있다. 이는 회전자와 고정자사이에 정전력의 힘에 의한 구동력이 발생되기 때문이다.



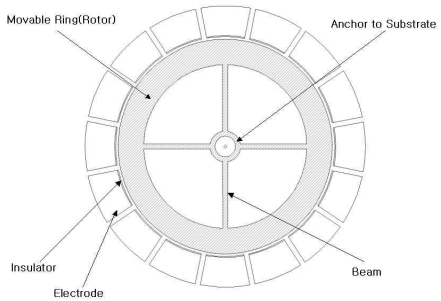
[Fig. 1] Condenser for the Flat



[Fig. 2] Rotor & Stator

4. 회전형 마이크로 액추이터 모델

본 연구에서 적용한 액추에이터는 마이크로 모터와 같이 정전력을 이용하여 구동하게 되며, 위치제어를 하는 센서로서 사용된다[8]. 제조과정 역시 동일한 실리콘의 반도체 가공에 의해 제작될 수 있다. 마이크로 액추에이터의 구조를 Fig. 3에 나타냈으며, 움직이는 회전자(rotor)와 그 주위의 전극(electrode), 즉 고정자(stator)로 구성된다. 여기서, 회전자의 내부직경은 320 ㎛, 외부직경은 420 ㎛, 두께는 5 ㎛이다. 각 전극에 연차적으로 전압이 공급됨에 따라 고정된 중심부로 인한 약간의 비틀림을 유발하며, 회전자는 전극 주위를 움직이게 된다. 회전자와 전극사이에



[Fig. 3] Structure of micro actuator

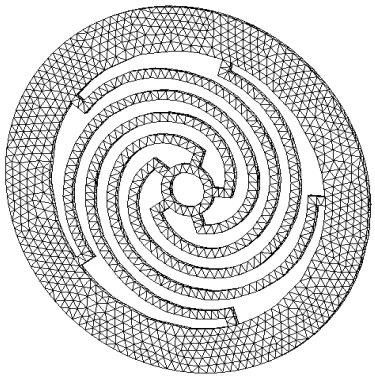
유발되는 정전력의 힘에 의해 구동력이 발생되는 것이다. 본 해석에서 사용한 마이크로 액추에이터에 사용된 실리콘 재료의 물성치는 Table 1.1과 같다.

[Table 1.1] Material properties

Material	Si
Young's modules	190 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	7 GPa
Mass density	2300 kg/m3

6. 유한요소해석 및 결과

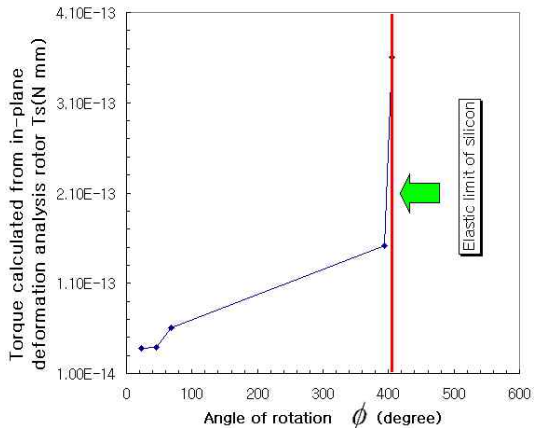
본 연구에서 적용한 마이크로 액추에이터의 실제적인 구동을 묘사하기 위해서는 자중에 의한 해석, 모드해석, 그리고 변형해석 및 정전장 해석 등 여러 가지 해석을 필요로 한다. 마이크로 정전 액추에이터를 설계하기 위해 본 연구에서는 형상에 따른 미세 회전운동을 분석하고자 (a) 자중에 의한 변형해석, (b) 모드해석, (c) 구동시 회전자의 움직임에 따른 변형해석, (d) 정전장 해석을 수행하였다. 액추에이터의 유한요소 해석은 범용 해석코드인 ANSYS를 이용하였다. Fig. 4는 FE 모델을 나타내었다.



[Fig. 4] FE model of micro actuator

먼저 회전자의 자중에 의한 변형해석으로 처짐량을 구하였다. 최대 처짐량은 $0.694\times10^{-4}mm$로 계산되었다. 이 값은 회전자의 두께가 5㎛이므로, 자중에 의한 처짐 현상은 본 마이크로 액추에이터의 설계 시 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다. 그리고 회전자의 Mode 분석은 기계류에 쓰이는 것처럼 동적인 실행작업을 하기 위한 것이다. 1차 Mode의 고유진동수는 50.519 kHz이고 2차 Mode의 고유진동수는 50.626 kHz이다. 해석결과 정전 마이크로 액추에이터의 공진을 피하기 위한 최저 요구치인 10kHz를 만족하였다.

특히, 재료의 탄성한계내에서 회전자의 회전각(ø)과 회전자가 움직이기 위해 필요로 하는 토오크와의 관계를 정량적으로 분석하였다. 회전자는 전극의 내부 표면을 따라 회전하기 때문에 전극간 원주길이와 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 수행하여 반력(reaction force)을 이용, 토오크를 해석하였다. 해석결과 설계된 형상의 최대회전각 : 44.58°, 토오크는 3.75×10^{-14} N · mm로 계산되었다. 해석결과 중 시작토오크의 값은 정전장 해석의 결과와 연계하여 구동에 필요로 하는 전압을 유추하는데 사용되어진다. Fig. 5는 회전각에 따른 토오크 해석 결과이다.



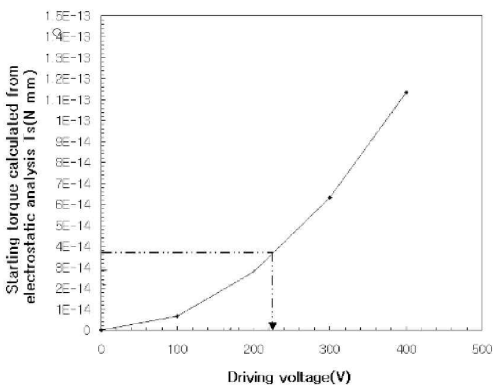
[Fig. 5] Starting torque and maximum rotation angle

일반적으로 마이크로 액추에이터의 성능을 평가하기 위해 정전장 해석을 수행했다. 시작토오크는 전압 V^2에 비례함으로 이론식에 의한 시작토오크는 전기적인 누설이 전혀 없다는 가정하에서 계산할 수 있으며, 유한요소해석에서는 전기적인 누설현상을 고려하기 위하여 마이크로 액추에이터의 실제적인 3차원 형상을 고려하여 해석하였다. 회전자와 고정자사이의 공기 gap에 대한 기하학적 형상 특성에 맞도록 무한대의 경계조건을 고려하기 위하여 공기의 큰 영역을 설정하였다.

재료물성치로는 공기의 유전율 8.854×10^{-12} C/Vm을 사용하였다. 해석방법은 회전형 액추에이터의 구동 방식을 적용하였다. 따라서 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. 이 순간에 포텐셜에너지가 저장되어 진다. 여기서 얻어지는 결과들은 정전장

해석으로부터 얻어진 전기적 포텐셜 에너지와 정전장 해석을 통하여 얻은 결과 값을 이용하여 시작토오크를 계산하였다. Fig. 6은 구동전압에 따른 시작토오크의 관계를 나타낸 것이다. 3차원 해석결과 역시 전압의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 그러나 이론식에 의한 결과와 비교하면 큰 차이를 보이고 있다. 이는 2차원 적인 이론식에 의한 결과는 전기적인 누설현상이 고려되지 않았기 때문이다.

전 절에서 얻어진 시작토오크의 값과 연계하면 구동에 필요한 전압을 유추해 낼 수 있다. 즉 형상 I의 경우는 실선으로 200 V가 요구되며, 형상 II의 경우는 점선으로 170 V가 요구됨을 알 수 있다. 또한, 형상 III의 마이크로 액추에이터가 구동하기 위해서는 이점쇄선으로 표시된 220 V의 전압이 필요하다는 것을 알 수 있었다.



[Fig. 6] Calculated starting torque vs. driving voltage

6. 결론

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

먼저 자중해석을 통해 마이크로 액추에이터의 최대 처짐은 아주 미소한 양으로 설계 시 고려하지 않아도 되는 인자임을 알 수 있었다. 그리고 설계된 마이크로 액추에이터의 형상에 따른 Mode 해석결과, 고유진동수의 최저 요구치인 10kHz를 모두 만족하였다. 또한 설계된 액추에이터의 형상에 따른 회전자의 변형해석을 수행하여 시작토오크와 탄성한계까지의 위치제어에 필요한 회전각을 구하였으며, 정전장 해석을 통하여 시작토오크는 전압 V^2에 비례함을 알 수 있었다.

또한, 변형해석의 결과와 연계하여 구동에 필요한 전압을 유추할 수 있었다.

참고문헌

[1] 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.

[2] Carey, G. F., Sharma, M., Wang, K. C., and Pardhanani, A., "Some Aspects of Adaptive Grid Computations", Computers and Structures, Vol. 30, pp. 297-302, 1988.

[3] Sloan, S. W., "A Fast Algorithm for Constructing Delaunay Triangulation in the Plane", Advances in Engineering Software, Vol. 9, pp. 34-55, 1987.

[4] Sezer, L. and Zeid, I., "Automatic Quadrilateral/ Triangular Free-Form Mesh Generation For Planner-Regions", International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, pp. 1441-1483, 1991.

[5] Pourazady, M. and Radhakrishnan, M., "Optimization of a Triangular Mesh", Computers and Structures, Vol. 40, No. 3, pp. 795-804, 1991.

[6] Frey, W. H., "Selective Refinement: "A New Strategy for Automatic Node Placement in Graded Triangular Meshes", International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, pp. 2183-2200, 1989.

[7] Siva P. N., Sri, H. B. and Prakash G. S., "An Adaptive Mesh Generation Scheme for Finite Element Analysis", Computers and Structures, Vol. 50, No. 1, pp. 1-9, 1994

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