

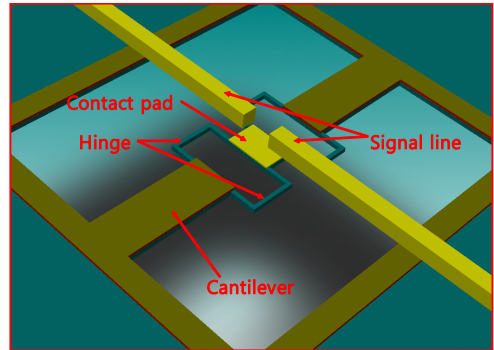
유한요소기법(FEM)을 통한 압전구동 RF MEMS 스위치의 최적화 설계 및 해석

양창수, 박재영
 광운대학교 전자공학부

FEM Modelling of Piezoelectric RF MEMS Switches

Chang Soo Yang, Jae Yeoung Park
 Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University

Abstract - 본 논문에서는 저전압에서 구동 할 수 있는 압전구동 방식의 RF MEMS 스위치를 설계하였다. 설계는 유한요소기법(FEM)을 지원하는 시뮬레이터 (ConvectorWare)를 사용하여 수행하였고, 이를 바탕으로 deflection, contact force, stress 등 기계적인 해석을 함으로써 최적화된 설계를 할 수 있었다. 이번 설계에서는 적절한 contact force를 유지하면서 hinge에서 받는 stress를 최소화하기 위하여 구동기를 2개 사용한 듀얼형식의 모델을 제안하였고, hinge의 모양은 'c'로 하여 deflection을 향상시켰다. 이 듀얼형식의 최적화된 모델은 signal line과 contact pad 간의 gap이 3.4μm일 때, 최초 2.8V에서 contact이 이루어졌으며, 5V에서 12.4μN의 contact force와 116MPa의 stress를 얻었고, 차후, SP4T나 SP6T 등의 설계시 공간 효율이 높은 다양한 형태의 구조를 설계할 수 있다.



<그림 1> 제안한 dual cantilever 스위치의 구조도

1. 서 론

최근 컴퓨터의 급속한 발전에 따라 수치해석도 활발하게 진행되고 있는데, 그 중 유한요소기법은 컴퓨터 성능의 향상과 소프트웨어의 발전으로 단순한 해석의 수단으로서가 아니라 기존의 실험을 대신하는 수치 시뮬레이션으로서 그 신뢰도가 높아지고 있다. MEMS 분야에서도 MEMS 전용 tool이 개발되어 있을 정도로 많이 사용하고 있으며, 특히 압전물질에 대한 해석도 컴퓨터를 통해 미리 시뮬레이션 해 봄으로써 그 결과를 예측할 수 있어, 설계하는데 많은 도움을 주고 있다.

대다수의 RF MEMS 스위치가 신뢰성이 높은 electrostatic 구동 방식 [1]을 사용하는데, 이 방식은 구동 전압이 높을 뿐만 아니라 pull-in 전압이라는 불안정한 요소를 갖고 있다. 이 구동 전압을 낮추기 위한 노력으로 많은 연구들이 진행되었는데, electrothermal 구동 방식[2], electromagnetic과 electrostatic을 병합시킨 구동 방식[3] 등이 있다. 하지만 이러한 방식들도 여전히 전력소모가 높고, 스위칭 속도가 낮다는 단점이 있다. 이에 반해 압전 구동 방식[4~5]은 낮은 구동 전압과 전력소모, 빠른 스위칭 속도를 갖는다. 이러한 RF MEMS 스위치를 설계하는데 있어 중요한 특성들로는 Insertion Loss, Isolation, Return Loss 등 주파수 특성과 구동 전압, contact force, contact stress 등의 기계적인 특성들이 있는데, 대부분은 주파수 특성을 중점적으로 연구하고 있다. 게다가 압전 구동 방식의 경우 구동 전압을 계산할 수 있는 많은 수식들[6]이 있어 쉽게 예측할 수 있지만, contact pad나 hinge와 같은 변수들이 존재하고, contact force나 stress 같은 경우는 쉽게 예측할 수 있는 특성이 아닐뿐더러 Insertion Loss나 신뢰성에 많은 영향을 주기 때문에 설계시 간과할 수 없는 특성들이다. 이러한 특성들은 유한요소기법을 통해 해석함으로써 실험을 통해 해석하는 것보다 시간과 공정비용을 절감할 수 있다. 본 논문에서는 구동 전압이 낮은 압전 구동기를 이용한 스위치를 설계하였고, 유한요소기법(FEM)을 지원하는 시뮬레이터 (ConvectorWare)를 사용하여 기계적인 해석을 통해 최적화된 모델을 설계하였다. 구동기의 구조는 1.2μm 두께의 low stress silicon nitride(SiN)와 0.5μm 두께의 PZT(Zr/Ti=52/48)로 구성되어 있다.

2. 본 론

2.1 Calculation of Deflection Curve

본 논문에서 제안한 dual cantilever 스위치의 구조는 <그림1>과 같이 contact pad의 양쪽에 구동기를 연결하여 하나의 구동기만 사용했을 때보다 contact pad의 수평을 유지하면서, contact force와 hinge에서 받는 stress 등을 개선하여 설계하였다. 이와 같은 압전 구동 방식의 RF MEMS 스위치의 경우 구동기의 구동 전압을 간단하게 구할 수 있는데, 다음은 입력 전압에 따른 구동기 끝의 deflection을 구하는 수식[6]이다.

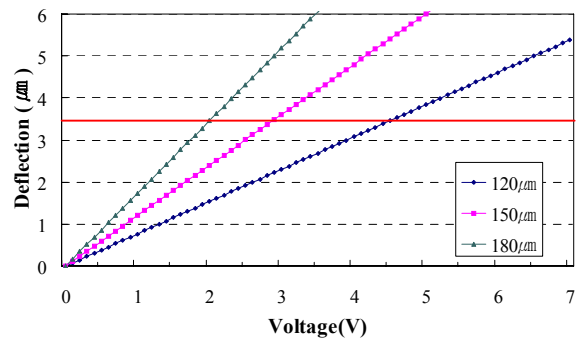
$$\delta = \frac{M_{sub} \cdot L_{piezo}^2}{2E_{sub} I_{sub}} \tag{1}$$

여기서 M_{sub} 과 I_{sub} 은 SiN의 bending moment와 inertial moment를 말하고 각각은 다음과 같이 구할 수 있다.

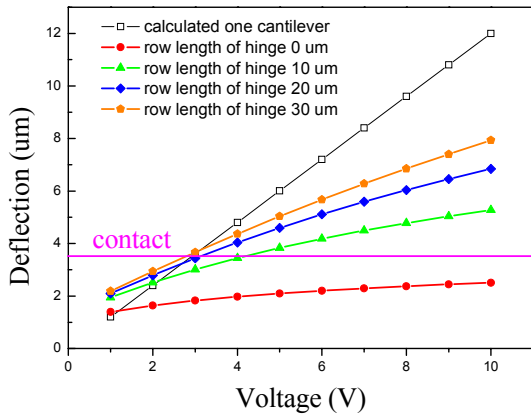
$$M_{sub} = \frac{t_{sub} d_{31} V}{2t_{piezo}} \left(\frac{1}{E_{sub} A_{sub}} + \frac{t_{sub}(t_{sub} + t_{piezo})}{4E_{sub} I_{sub}} + \frac{1}{E_{piezo} A_{piezo}} \right)^{-1} \tag{2}$$

$$I_{sub} = \frac{(w \cdot t_{sub}^3)}{12} \tag{3}$$

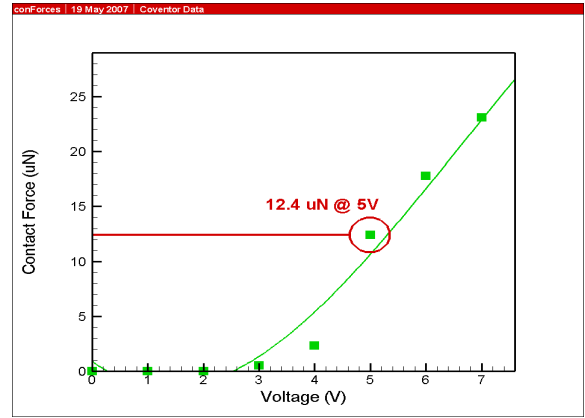
위 식들에서 t 는 각각의 두께, E 는 young's modulus, L 과 w 는 구동기의 길이와 너비, V 는 입력 전압, 그리고 d_{31} 은 PZT의 piezoelectric constant를 말한다. 마지막으로 A 는 각각의 단면적으로 각각의 두께(t)와 구동기의 너비(w)를 곱해서 구할 수 있다. <그림2>는 위 식을 이용해서 입력 전압에 따른 deflection curve를 나타낸 그림이다. 위의 식을 풀어보면 구동기의 너비는 서로 약분되어 deflection에 영향을 미치지 않으므로 편의상 60μm로 고정하였고, 구동기의 길이를 변화해 가며 그래프를 그려 보았다. <그림2>를 보면 contact pad와 signal line의 gap이 3.5μm라 할 때, 구동기의 길이가 150μm이어야 입력 전압이 3V에서 작동함을 알 수 있다.



<그림 2> 식(1)에 의해 계산된 Deflection Curve



<그림 3> hinge의 가로 길이 변화에 따른 deflection curve

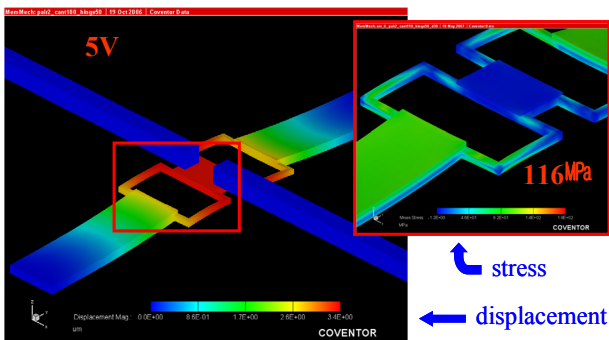


<그림 5> 최적화된 모델의 Contact Force

2.2 Design and Analysis of Dual Cantilever Switch

수식(1)을 이용하면 구동 전압을 쉽게 유추해 낼 수 있다. 하지만, 수식(1)은 간단한 구조의 압전 구동기의 deflection을 계산할 뿐 이번엔 제안한 dual cantilever switch 같은 구조에서는 다소 다른 결과가 나타날 수 있다. 특히, 이 구조처럼 양쪽 끝을 고정시킬 경우 수식에 의한 계산과 많은 차이가 난다. 그 이유는 구동기의 substrate로 사용한 silicon nitride의 내부인력이 강해서 잘 늘어나지 않기 때문이다. 그래서 hinge 부분을 “ㄷ” 모양으로 해서 구동기가 deflection을 일으키면 hinge가 잘 휘어질 수 있도록 하여 contact pad의 변위가 커지도록 하였다. <그림 3>은 hinge의 가로 길이의 변화에 따른 deflection을 FEM 시뮬레이터를 이용해 도출한 결과이다. 이 때, signal line과 contact pad는 Gold를 사용하고, PZT의 양 전극은 Pt를 사용하였다. 그리고 hinge의 세로 길이는 50 μ m로 고정하였다. <그림3>을 보면 식을 통해 계산한 결과와 다소 차이는 있지만, hinge의 가로길이가 길어질수록 deflection은 점차 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 30 μ m를 넘어서면 contact pad가 안쪽으로 오목하게 휘어지는 현상이 발생한다. 이는 구동기가 변형하려는 힘이 hinge에서 다 흡수하지 못하고 contact pad까지 전달되어 발생하는 현상으로 주파수 특성에서의 Insertion Loss에 안 좋은 영향을 끼칠 수 있다.

<그림 4>는 최적화된 모델의 dual cantilever switch에 5V의 전압을 인가하여 시뮬레이션한 3D 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 contact pad가 거의 평평한 것을 확인 할 수 있다. 이것을 더 확대하면 signal line과 수 나노의 gap이 생기거나 이것은 큰 문제가 되지 않는다. 하지만, hinge의 길이를 늘이거나 인가전압을 상승시키면, hinge에서 받는 stress는 감소하나 그 힘이 contact pad까지 전달되어 크기는 백수십 나노의 gap이 생겨 Insertion Loss에 안 좋은 영향을 끼칠 수 있다. 또한, contact force도 무리하게 커져서 contact pad와 signal line이 접하는 부분에 마모 현상이 와서 신뢰성에도 문제를 발생시킬 우려가 있다. 따라서 본 연구에서 FEM 시뮬레이션을 통해 최적화된 모델을 제시하고자 한다. 마지막으로 <그림 5>는 최적화된 모델의 contact force를 나타낸 그림으로 최소 2.8V에서 스위치가 on 상태로 작동하나 contact force가 약해 Insertion Loss가 예상보다 안 좋게 나올 수 있다. 하지만 5V 근처에서는 충분한 contact force가 유지됨을 알 수 있다.



<그림 4> 최적화된 모델의 dual cantilever switch에 5V의 전압을 인가한 시뮬레이션한 3D 결과

3. 결론

본 논문에서는 압전 구동 방식의 RF MEMS 스위치를 제작하기에 앞서 FEM 시뮬레이션을 통해 최적화된 모델을 제시하였다. 이는 제작과정에서 발생하는 많은 시간과 공정비용을 줄여주고, 예상치 못한 문제들을 미리 발견하여 개선함으로써 향후 연구개발에 큰 도움이 되리라 예상된다.

4. 감사의 글

연구는 한국 과학기술부의 지능형 RF연구센터(Communication and Intelligent RF Engineering Research Center(ERC))의 지원을 받아 수행하였음.

[참고 문헌]

- [1] J. B. Muldavin and G. M. Gabriel, "All metal high isolation series and series/shunt MEMS switches", IEEE Microwave and Wireless Components Letter, vol. 11, no. 11, pp. 373 ~ 375, Sep. 2001.
- [2] Ye Wang, Zhihong Li, McCormick, and D.T., Tien, N.C., "A low-voltage lateral MEMS switch with high RF performance", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 13, no. 6, pp. 902 ~ 911, Dec. 2004.
- [3] Il-Joo Cho, Taeksang Song, Sang-Hyun Baek, and Euisik Yoon, "A low-voltage and low-power RF MEMS series and shunt switches actuated by combination of electromagnetic and electrostatic forces", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 7, pp. 2450 ~ 2457, July 2005.
- [4] Zhang, Q.Q., S.J. Gross, S. Tadigadapa, T.N. Jackson, F.T. Djuth, S. Trolrier-McKinstry, "Lead Zirconate Titanate Films for d33 Mode Cantilevers Actuators", Sensors and actuators A, Vol 105, pp.91-97, 2003.
- [5] Jea Y. Park, Hee C. Lee, and Jong U. Bu, "Low Voltage Operated Piezoelectric RF MEMS Switches for Advanced Handset Applications", Proc.34th European microwave conference, Amsterdam, pp.1437-1440, 2004.
- [6] E. F. Crawley and J. Luis, "Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures", American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, vol. 25, no. 10, pp. 1373~1385, October 1987.