

정전 구동 수평 거동 z-형 MEMS 스위치의 특성

홍영택, 오재근, 최범규  
서강대학교 기계공학과

The Characteristics for the Electrostatically Actuated z-Shaped Laterally Driven MEMS Switch

Young-tack Hong, Jae-geun Oh, Bum-kyoo Choi  
Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

**Abstract** - we present the characteristics of microwave and mechanical behavior for the electrostatically actuated z-shaped laterally driven micromachined CPW SPST(Single Pole Single Throw) Switch, which is for the application of the microwave communication systems. In this paper, we have aimed to maintain advantages, such as low insertion loss and low power consumption that the previously developed RF MEMS Switch has and minimize also stiction problem, enhance the microwave characteristics by etching of substrate beneath the switch, realize the pull-in voltage of below 30V. The optimized design parameters of the MEMS Switch can be selected by the analysis of the mechanical behavior and the use of ANSYS simulation method.

고, 서로 마주보는 전송선로가 정전력에 의해 On/Off 되도록 한다.

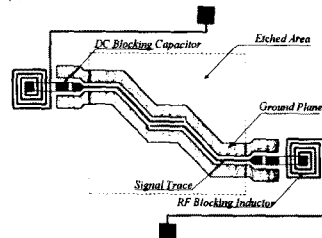


그림 1 CPW 형태의 z-형 외팔보 마이크로파 MEMS 스위치

마이크로 구조물 제작시 점착 문제를 피하는 방법중, 본 논문에서는 구조물 아래의 기판 영역을 식각에 의해 제거함으로써 Van der Waals 힘과, 모세관력을 최소화 하도록 하였다.

1. 서 론

통신 시스템 부품으로는 세계적으로 LNA(Low Noise Amplifier), Mixer, Oscillator와 연계 가능한 스위치, 필터, 안테나 배열과 같은 개별 부품의 연구가 진행되고 있다. ([1]~[4]) 반도체 스위치의 경우 DC Bias에 의한 Diode의 통전 및 차단을 통해 스위치의 기능을 수행할 때 통전 저항(on resistance)에 의해 전력 소모가 발생하고, Off-chip 형태로 인해 Interface에 장애요인이 된다. 이에 대해 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)연구가 제시되고 있으나 가격적인 측면에서 실리콘을 사용할 때보다 불리하고, 시스템 집적시 CMOS 소자와의 집적이 용이하지 않다. 그러므로, MEMS 기술을 이용한 스위치는 기판 재료로 실리콘뿐만 아니라 GaAs, Glass의 사용이 가능하고, CMOS 소자뿐만 아니라 MMIC 소자와 집적 및 Packaging이 가능하므로 마이크로파 MEMS 스위치의 개발은 통신 시스템 고집적화에 기여할 바가 클 것이다. MEMS 스위치의 일반적인 형태는 CPW 위에 구성된 박막 브릿지 형태로서 스프링으로 지지된 박막의 거동에 의해 On/Off 작동을 하는데, 이와 같은 구조는 제작이 용이하다는 장점이 있으나, 스프링으로 지지할 수 있는 박막의 무게에 한계가 있고, 가장 큰 단점인 점착 문제가 있다. ([5],[6]) 본 논문에서는 수평거동하는 스위치를 모델링하고 제작하였다. 기계적인 해석에 의해 스위치의 선형적인 거동으로 향상된 특성을 확인한다. 또한, z-형 모델이 Gap/6을 이용하여 30V 이하의 전압이 됨을 계산과 ANSYS 시뮬레이션을 통해 확인한다.

2. 본 론

2.1 수평 거동 Z-형 스위치의 설계

본 논문에서는 수평 거동 Z-형 외팔보를 스위치로 제작하여 스위치 자체로서 전송 선로를 구성하도록 하

2.2 MEMS Switch의 마이크로파 해석

후막 감광제를 사용하는 MEMS 스위치는 지금까지 연구 되어온 박막 스위치와 달리 스위치의 단면이 기존의 스위치에 비해 매우 넓다. 스위치의 단면적이 넓어지면, 마이크로파 측면에서 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 전달할 수 있는 Power가 높아진다. 둘째, MEMS 스위치 자체로서 CPW를 구성하게 되므로, Conductor trace의 두께가 두꺼워지게 되며, 특성 임피던스를 공정 변수에 따라 조정하기가 수월해진다. 이외에도, 공기를 유전물질로 사용하게 되면 기존의 CPW나 Microstrip line과 같은 전송 선로가 갖는 문제점인 주파수 증가에 따른 Non-TEM mode 전파, Dielectric loss 증가를 억제할 수 있다. 또한, 기판의 밀바닥을 식각하므로 기판과 전송선로 사이의 coupling에 의해 일어나는 손실을 줄일 수 있다.

(1) 특성 임피던스

본 논문에서 제시하는 마이크로파 MEMS 스위치는 두 개의 전송 선로를 접촉시킴으로써 스위치를 동작시키게 된다. CPW 형태의 마이크로파 MEMS 스위치의 경우 특성 임피던스는 전송선로이론을 이용하여 구할 수 있다. 두께가 10 $\mu$ m, 20 $\mu$ m, 30 $\mu$ m, 40 $\mu$ m, 50 $\mu$ m일 때의 특성 임피던스는 표 1와 같다.

두께( $\mu$ m)	10	20	30	40	50
$Z_0$ [ $\Omega$ ]	121.98	92.16	74.51	61.90	53.17

표 1 MEMS 스위치의 두께(t=10,20,30,40,50)에 따른 특성 임피던스 변화

표 1과 같이 본 논문에서 제시한 CPW 형태의

MEMS 스위치의 경우, 특성 임피던스는  $50\Omega$ 에 근접하도록 설계하였다.

### 2.3 Z-형 외팔보의 정적 해석과 Pull-in 전압

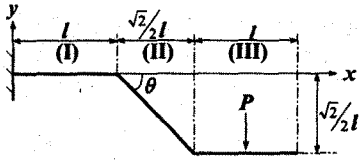


그림 2 집중 하중(P)이 작용하는 z-형 외팔보 모델

요소로 분할하여 보의 변형을 구하기 위해서 변형은 소변형(Small Deformation)이고, 집중하중 P는  $\pm y$  방향으로만 작용한다는 두 가지 전체 조건을 만족시켜야 한다.

각 요소에서 처짐식을 구하면 [7], [8]

$$\text{요소 (I)} \quad y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3ax^2), \quad 0 \leq x < l$$

(1)

요소(II)의 경우 보가  $\theta$ 만큼 꺾인 형태를 취하고 있으므로, 그림3과 같이  $\theta$ 만큼 회전 변환을 수행하여 모멘트-곡률 방정식을 구한다. 대문자 X, Y는 신좌표계를 나타낸다. 회전 변환을 수행하면, 변환전의 전단력(V)이 전단력(V')과 축력(F: Axial force)으로 분할되며, 해석의 용이성을 위해 축력은 고려하지 않고 신좌표계에서, 모멘트-곡률 방정식을 구한다.

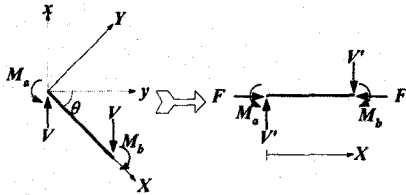


그림 3 축변환 이후의 요소(II)에 대한 자유 물체도

$$\text{요소(II)} \quad Y = \frac{1}{6EI}[-P\cos\theta X^3 + 3M_a X^2 + 6EIBX] \quad (2)$$

$$\text{요소(III)} \quad y(x) = \frac{1}{6EI} \left[ P \left( x - \frac{l}{2} \right)^3 - Px^3 + \frac{3Pl}{2} x^2 + \left( \frac{3\sqrt{2}+6}{2} P l^2 + 6EIB \right) x \right]$$

$$M_b = M_a - Pl\cos\theta = \frac{1}{2} Pl, \quad b = \frac{l}{2}. \quad (3)$$

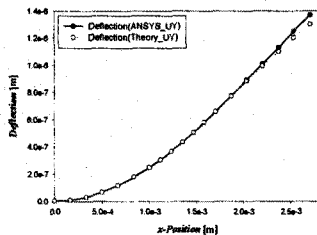


그림 4 z-형 외팔보의 집중하중( $P=0.2214\mu\text{N}$ )에 따른 각 지점에서의 y-방향 처짐 계산 결과와 ANSYS 해석 결과의 비교

식(1)~(3)로부터 y-방향으로 전체 최대 처짐은

$\delta_{Max}$ 라고 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{Max(I)} = y(l)_{(I)}, \quad \delta_{Max(II)} = y(l/\sqrt{2})_{(II)}, \quad (4)$$

$$\delta_{Max(III)} = y(l)_{(III)}, \quad \delta_{Max} = \delta_{Max(I)} + \delta_{Max(II)} + \delta_{Max(III)}$$

집중 하중(P)이 지지점으로부터  $x = (3 + \sqrt{2})l/2$ 인 지점에 작용하고 있을 때의 y-방향 최대 처짐의 관계를 그래프로 표시하면 그림 4와 같다. ( $t=10\mu\text{m}$ ,  $h=50\mu\text{m}$ ,  $g=20\mu\text{m}$ ,  $l=1000\mu\text{m}$ ,  $P=0.2214\mu\text{N}$ )

계산 결과와 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 이용한 계산 결과에 차이가 있는데, 이것은 해석시 요소(II)의 Axial Force를 무시하고 해석함에 기인한다.

Pull-in 전압에 대하여, M. Fischer 등은 단순화한 스프링 모델에 대하여 정전기력과 기계적인 스프링 반력의 상관 관계로부터 Pull-in 전압을 유도하였다. [10]

$$V_{PI} = V(2d/3) = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 A} d^3} \quad (5)$$

본 논문에서 제시한 z-형 외팔보에 대하여, Pull-in 전압을 구하기 위해 스프링 상수를 구하면, ANSYS 시뮬레이션 결과 및 해석 결과에 대한 기술기를 구하여, 이 값을 스프링 상수(k) 값으로 한다. 해석 결과 스프링 상수는  $0.1549(\text{N/m})$ 이다. 여기서,  $A=50.000\mu\text{m}^2$ ,  $d=20\mu\text{m}$ 이다. 그림 4에서  $x=13.33\mu\text{m}$ 일 때, Pull-in이 발생하며 이때의 Pull-in 전압은  $V_{PI}=28.8991\text{V}$ 이다.

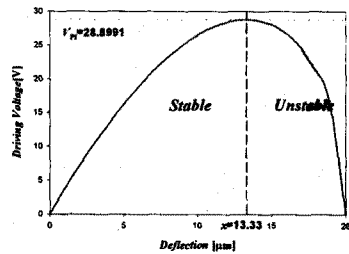


그림 5 z-형 외팔보 모델의 Pull-in 전압 (k는 ANSYS로부터 구함)

Petersen의 Pull-in 전압의 정의에 따르면 간극의 1/3 지점에서 Pull-in 전압이 형성된다. [9] 그러나, 본 논문에서 제시한 z-형 외팔보의 경우 그림 6에서 보는 것 처럼 두 개의 외팔보가 서로의 인력에 의해 서로 끌리는 형태이므로 z-형 외팔보의 처짐식으로부터 Pull-in 전압을 구할 때는 시스템이 "Unstable"한 지점이  $g/3$ 일 때의 인가 전압을 구하는 것이 아니라  $g/6$ 일 때의 인가 전압을 구하면 이때의 인가 전압이 Pull-in 전압이다. 처짐식으로부터 z-형 외팔보의 Pull-in 전압을 구하면, 하중식에서  $\delta_{Max}=g/6$ 일 때의 하중을 구하고, 이 하중으로부터 인가전압을 구하면 된다. 계산 결과,  $t=10\mu\text{m}$ ,  $h=50\mu\text{m}$ ,  $g=20\mu\text{m}$ ,  $l=1000\mu\text{m}$ 인 z-형 외팔보에 대하여 Pull-in 전압은 약 30V일 때이다.

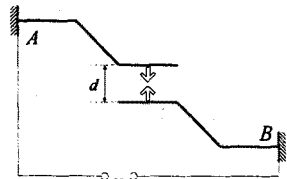


그림 6 전압 인가시 두 z-형 외팔보의 거동

ANSYS 계산과 수식 Pull-in 전압은 약 1.1V의 차이가 있는데, 이 차이는 처짐식 계산시 요소(II)에서 축력을 고려하지 않으므로 발생한 오차이다.

## 2.4 수평거동 Z-형 스위치의 제작 공정

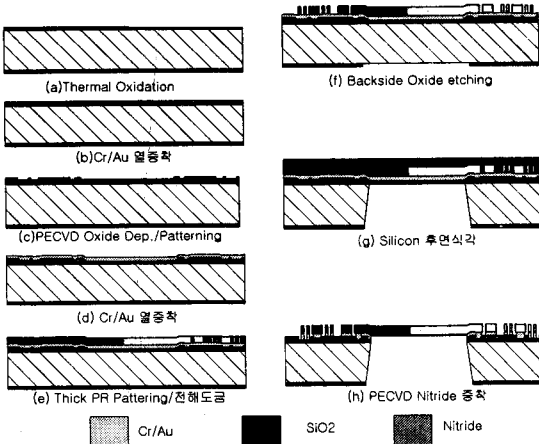


그림 7 Z-형 MEMS Switch 제작 공정

그림 7은 스위치의 제작 공정을 나타낸다. p-type <100> Silicon 기판을 이용하여 열산화막을 만들고, DC Blocking capacitor의 Bottom electrode로 사용되는 Cr/Au 층을 열증착한다. 이후에 DC blocking capacitor의 유전체층을 형성하기 위해 Oxide를 증착시키고 패터닝한다. 전해도금 Seed layer로 사용되는 Cr/Au를 열증착하고 전해 도금한다. EDP를 이용한 Silicon 식각시 도금된 구조물이 용액의 침투로 인하여 기판에서 떨어짐을 방지하기 위하여 Parylene Coating을 수행한 후에 열산화막을 마스크로 사용하여 식각 공정을 수행하고 Parylene을 RIE를 이용하여 건식 식각한다. 수평 거동 용량성 MEMS 스위치의 구성을 위해서 스위치의 옆면을 유전체로 만들기 위해 PECVD Nitride를 증착한다. 이를 통해 제작되어진 스위치의 사진이 그림 8에 보여진다.



그림 8 CPW 형태의 z-형 외팔보 마이크로파 MEMS 스위치(SPST)

## 3. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 MEMS 스위치에 대해, 점착 발생 가능성이 적으면서 두께가 얇아짐에 따른 높은 Power 전송 문제를 해결할 수 있는 구조로 설계, 기계적 거동 및 마이크로파 특성 해석 및 시뮬레이션 결과에 대해 다루었다. 해석 및 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제시한 z-형 외팔보 모델의 경우 요소(III) 영역에서 정전기력에 의한 외팔보 변형이 직선에 가까우며, 스위치 아래의 실리콘 영역을 식각을 통해 제거함으로써 스위치와 기판 사이의 결합에 의한 손실 및 점착 가능성을 최소화 됨을 확인하였다. 앞으로의 연구에서는 보다 미세한 형상을 구현할 수 있는 감광제를 사용하여, 스위치의

전체 길이를 줄일 수 있는 방안을 모색하여야 하며, 도금에 의해 제작된 박막의 물성치를 측정하고, 유한 요소 해석시 이를 고려한 해석이 필요하다. 또한 수평 거동 Z-형 SPDT(Single Pole Double Throw) Switch의 제작도 매우 유용할 것으로 기대된다.

### [참고 문헌]

- [1] Clark T.C. Nguyen, Linda P. B. Kathehi and Gabriel M. Rebeiz, "Micromachined Devices for Wireless Communications", Proceedings of the IEEE, Vol 86, No 8., pp. 1764~1765
- [2] 김정우, 송인상, 천창률, 권영우, 송기무, "밀리미터파 발진기용 미세가공 캐버티 공진기", 제1회 MEMS 학술대회, pp. 79~83, 1999
- [3] J. Y. Park, "Packaging-Compatible Micromachined Magnetic Devices: Integrated Passive Components and Modules", Thesis of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, 1997
- [4] Nguyen, loc cit pp. 1759~1760
- [5] Pacheco, loc cit, p. 1569
- [6] Pacheco, loc cit, p. 1569
- [7] Thomas J. Lardner, Robert R. Archer, Mechanics of Solids, 임재규 외 공역, (시그마 프레스:대한민국, 1996)
- [8] Stephan H. Crandall, An Introduction to the Mechanics of Solids(2nd ed:Singapore:McGRAW-HILL International,1978)
- [9] Petersen, K. E., "Dynamic Micromechanics on Silicon: Technique and Devices", *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Vol.ED-25, pp. 1242-1249, 1978
- [10] M. Fischer, M. Giousouf, J. Schaepperle, D. Eichner, M. Weinmann, W. von Münch, F. Assmus, "Electrostatically deflectable polysilicon micromirrors-dynamic behavior and comparison with the results from FEM modelling with ANSYS", *Sensors and Actuators, A67*, pp. 89-95, 1998
- [11] 오재근, "A Study on the Characteristics of Microwave and Mechanical Behavior for the Electrostatically Actuated Capacitive MEMS Switch", 서강대학교 기계공학과 석사학위논문, 1999