

기생 전하에 의한 RF-MEMS 스위치의 고유주파수 이동

Natural Frequency Shift of RF MEMS switches due to Parasitic Charges

이진우†
Jin Woo Lee

1. 서론

RF-MEMS 스위치는 전통적인 스위치(solid-state switch)에 비하여 크기와 성능 면에서 아주 우수하여 다양한 분야의 전자 부품 소재로 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 특히, 크기가 작고, 넓은 주파수 대역에서 낮은 전력 소비/손실과 높은 스위치 속도(high switching speed) 때문에 위성 통신 시스템(satellite communication system), RF 태그(tag), 개인 무선 통신 시스템에 적용 가능하다. 이런 RF-MEMS 스위치는 정전기력(electrostatic force) 또는 전자기력(electromagnetic force)에 의해 작동하는데, 외팔보를 사용하는 저항형 스위치(resistive switch)와 용량형 스위치(capacitive switch)로 나누어 진다⁽²⁾.

4 세대 MEMS 장치에 속하는 RF-MEMS 스위치는 높은 성능을 발휘하기 위해, 장치의 일부가 움직여서 면대면 접촉/충돌(impact)한다⁽³⁾. 오랜 시간이 지나면, 반복적인 접촉과 충돌로 인해 스위치의 기계 구성 요소가 마모(wear)되거나 파손된다. 따라서, MEMS 스위치의 동역학적 거동을 정확히 파악하여, 현재의 마모 정도와 미래의 파손 시점을 추정하는 연구는 MEMS 스위치의 상용화에 반드시 필요하다.

Fig. 1의 용량형 스위치는 표면이 유전 층(dielectric layer)으로 도포된 바닥 전극과 양쪽 끝이 고정된 상부 전도체(upper conductor)로 구성되고, 바닥 전극과 상부 전도체의 전위차(=전압)에 의해 작동한다. 공급되는 전압이 '0' 일 때, 입력 단의 신호가 출력 단으로 자유롭게 전달되고, 전압이 증가 되면 상부 전도체가 아래로 이동하기 시작한다. 전압에 의한 정전기력이 상부 전도체의 탄성 복원력보다 크게 되는 순간, 상부 전도체가 하부 전극과 접촉하여 신호 전달을 막는다. 이 때의 전압을 pull-in 전압이라고 하고, 접촉에 의해 상부 전도체의 전하의 일부가 유전 물질로 옮겨간다. 이런 현상을 유전 물질 충전(dielectric charging)현상이라고 하고,

이렇게 옮겨간 전하를 기생 전하(parasitic charges)라고 한다⁽⁴⁾. 이 기생 전하 때문에, 용량형 스위치의 pull-in 전압이 변화되고, 기생 전하의 수가 많아지면 스위치는 더 이상 작동할 수 없다⁽³⁾.

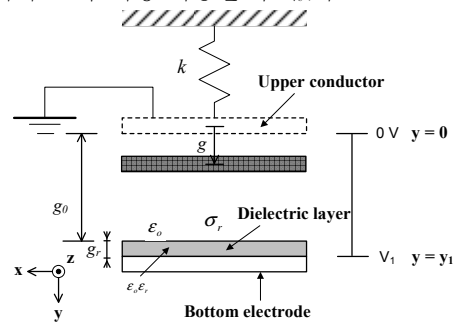


Fig. 1 용량형 스위치 (capacitive switch)

현재 사용되고 있는 전기 용량형 스위치의 이상 진단 방법은 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 정전 용량(capacitance)과 전압 곡선의 변화를 살펴 보는 것이다. 그러나, pull-in 전압에 도달 하기 전까지는 전압에 대한 정전 용량의 변화율이 작아서 기생 전하에 의한 스위치의 이상 여부를 판단하기 어렵다⁽⁵⁾.

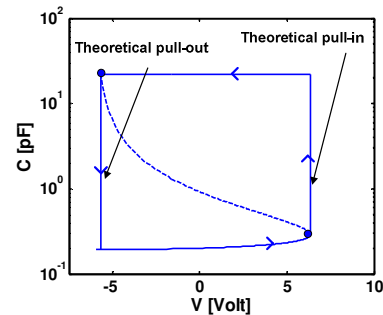


Fig. 2 용량형 스위치의 정전 용량과 전압 곡선
본 연구에서는 용량형 스위치의 상부 전도체와 하부 전극 사이의 전압과 유전 층에 축적된 기생 전하에 의한 상부 전도체의 고유 주파수를 예측할 수 있는 동역학적 모델을 구성하고자 한다. 이 모델의 고유 주파수 변화를 관측하여, 용량형 RF-MEMS 스위치의 pull-in 현상이 발생하기 전에 스위치의 이상 여부를 진단할 수 있는 방법을 제안한다.

† 이진우; 아주대학교 기계공학부
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr
Tel : (031) 219-3659, Fax : (031) 219-1611

2. 본 론

2.1 RF-MEMS 스위치 정전용량과 전압 곡선

Fig. 1 에서 보듯이, 상부 전도체의 탄성 복원력을 고려하기 위해 선형 스프링 k 을 사용하여 상부 전도체와 지면을 연결하였고, 모든 전기 요소는 z 축 방향으로 무한이 길다고 가정한다. 정전기력에 의해 상부 전도체가 움직이는 거리를 g 로 나타내고, 전압이 '0' 일 때의 상부 전도체와 유전 층과의 거리를 g_0 로 나타낸다. 유전 층의 두께 g_r 와 유전율 ϵ_r 을 고려하면, 이 스위치 모델의 정전 용량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{g_0 - g + g_r / \epsilon_r} \quad (1)$$

식 (1)에서 A 는 상부 전도체와 하부 전극이 공유하는 면적을, ϵ_0 는 공기의 유전율을 나타낸다. 유전 층(dielectric layer)위에 전하 밀도 σ_r 의 기생전하가 고르게 분포해 있다고 가정하면, 공급되는 전압에 발생하는 정전기력과 늘어나는 스프링에 발생하는 탄성 복원력은 각각 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{A}{\epsilon_0} \cdot \left(\frac{\epsilon_0 \cdot V_1 + g_r / \epsilon_r \cdot \sigma_r}{g_0 - g + g_r / \epsilon_r} \right)^2 \quad (2)$$

$$F_2 = k \cdot g_{eq} \quad (3)$$

탄성 복원력과 정전기력의 평형 조건 ($F_1 = F_2$)으로 부터 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$V_1 = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \left(\sqrt{\frac{2\epsilon_0}{A} k \cdot g_{eq} (g_0 - g_{eq} + g_r / \epsilon_r)^2 - g_r / \epsilon_r \cdot \sigma_r} \right) \quad (4)$$

식 (4)의 g_{eq} 는 인가된 전압에 의한 정전기력과 탄성 복원력에 의해 결정되는 평형 위치를 나타낸다. Fig. 2 는 식 (1)과 (2)에 의해 얻어 질 수 있으며, 식 (4)에서 알 수 있듯이, 동일한 평형 위치에 대해서도 기생 전하의 밀도에 따라 필요한 상부 전도체가 이동하는데 필요한 전압이 달라진다. 이런 변화가 pull-in 전압의 변화로 이어진다.

2.2 RF-MEMS 스위치의 고유 주파수

정전기력에 의한 상부 전도체의 운동은 힘 평형 방정식에 의해 결정되는 정적 운동과 평형 위치를 중심으로 미소 변위를 발생시키는 동적 운동으로 구분할 수 있다. 동적 운동을 발생시키는 힘은 평형 위치를 중심으로 Taylor 급수 전개를 하여 얻을 수 있다. 고차 항을 제외하면, 변위에 비례하는 1 차 항을 얻을 수 있다. 이 1 차 항의 계수가 정전기력에 의해 발생하는 강성 계수 Δk 이며, 식 (5)와 같이

표현된다.

$$\Delta k = -2 \cdot k \cdot g_{eq} \frac{1}{g_0 - g_{eq} + g_r / \epsilon_r} \quad (5)$$

정전기력에 의한 강성 계수를 고려한 상부 전도체의 고유주파수는 식 (6)에 의해 계산될 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k + \Delta k}{m}} \quad (6)$$

Fig. 3 에서는 기생 전하와 인가 전압의 몇 가지 조합에 대하여, 식 (6)을 이용하여, 고유 주파수를 계산할 결과를 나타낸다.

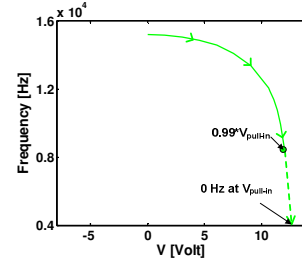


Fig. 3 기생 전하와 전압에 의한 고유주파수 변화

3. 결 론

본 연구에서는 기생 전하와 인가 전압에 의한 전기 용량형 멤스 스위치의 고유 주파수 변화를 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하고, 그 타당성에 대하여 간략히 살펴보았다.

참 고 문 헌

- (1) Yuan, X, Peng, Z., Hwang, J, C. M., Forehand, D. and Goldsmith, C. L., 2006, "A Transient SPICE model for Dielectric-Charging Effects in RF MES Capacitive Switches," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 53, pp. 2640~2648.
- (2) Granaldi, A. and Decuzzi, P., 2006, "The Dynamic Response of Resistive Microswitches: Switching and Bouncing," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, pp. 1108~1115.
- (3) Spengen, W. M. V., Puers, R., Mertens, R. and Wolf, I. D., 2004, "A Comprehensive Model to Predict the Charging and Reliability of Capacitive RF MEMS Switches," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 514~521.
- (4) Wibbeler, J., Pfeifer, G. and Hietschold, M., 1998, "Parasitic Charging of Dielectric Surfaces in Capacitive Microelectromechanical Systems," Sensors and Actuators A, Vol. 71, pp. 74-80.
- (5) Lee, J., W., Ajit, M., Raman, A. and Peroulis, D., 2010, "Vibration-based Monitoring and Diagnosis of Dielectric Charging in RF-MEMS Switches," Journal of Microelectromechanical Systems, in review.