

# RF-MEMS 스위치용 마이크로 외팔보의 동특성 해석

## Dynamic Analysis on a Microcantilever for RF-MEMS Switches

이진우†  
Jin Woo Lee

### 1. 서 론

직렬형 RF-MEMS 스위치는 신호 전송 라인(transmission line)과 평행하게 놓여진 초소형 외팔보(microcantilever)를 구동부(actuation part)로 갖는다. 외팔보(cantilever)의 끝이 바닥에 닿아 있을 때 신호가 통과하고, 떨어져 있을 때 신호 전달을 차단하게 된다. 외팔보의 상하 운동은 바닥과 외팔보 사이에 인가되는 전압에 의해 발생하는 정전기력(electrostatic force)과 외팔보의 탄성 복원력(elastic-restoring force)에 의해 결정된다. 정전기력이 인가되어 증가되면, 외팔보의 끝이 점차 하강하기 시작하고, 임계 전압에 도달하면, 갑자기 강하하여 바닥에 접촉한다. 일반적으로 접촉 속도(contact velocity)가 0 이 아니므로, 첫 번째 접촉 후 몇 번의 반복 접촉이 발생한다. 또한, 스위치가 열리는 순간에도 갑작스런 외팔보 끝의 상승 운동으로, 전압이 인가되기 전의 평형 위치(equilibrium position)를 중심으로 과도 진동이 발생한다. 이러한 과도 진동은 전달 되는 신호의 질을 떨어뜨리고, 스위치 개폐 시간(switch time)과 접촉 부의 마모(wear)를 증가 시켜서 장기 신뢰성(long-term reliability)에 문제를 발생시킨다.

이러한 과도 진동을 줄이기 위해 인가 전압을 적절히 조절하여 접촉 속도를 가능한 작게 만들어 반복 접촉의 횟수를 줄이는 연구<sup>(1)</sup>와 초소형 외팔보의 동적 특성을 파악하여 설계에 반영하는 연구<sup>(2)</sup>가 진행되어 오고 있다. 이 두 연구를 위해서는 외팔보를 둘러 싸는 유체와 외팔보의 상호 작용에 대한 완전한 이해가 필요하다. 일반적으로 외팔보와 바닥면 사이의 간격이 수 마이크로미터( $\mu\text{m}$ )이므로, 이

곳을 채우는 기체는 외팔보의 상하 운동에 외력을 작용한다고 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 이 외력은 외팔보 진동의 에너지를 소산시키는 역할을 하므로, 스퀴즈 필름 감쇠력(squeeze-film damping force)이라고 한다. 특히, 최근 진공에 가까운 저압(low pressure)에서 RF-MEMS 스위치가 포장(packaging)되어 사용되기 때문에 이 압력 범위에서 감쇠력이 정확히 예측되어야 한다

본 논문에서는 레이놀즈 방정식을 사용하여 초소형 외팔보의 고차 모드의 감쇠 계수를 이론적으로 계산하고자 한다. 이를 위해 레이놀즈 방정식과 법의 진동 방정식으로부터 주파수 응답함수를 유도하고, 반 동력점 법(half-power point method)를 이용하여 양질 계수(quality factor)를 계산한다.

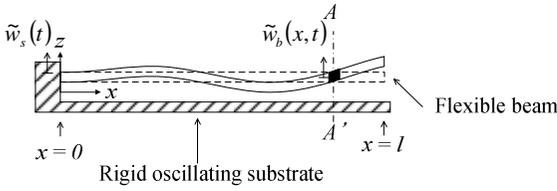
### 2. 초소형 외팔보의 주파수 응답함수

직렬형 RF-MEMS 스위치는 Fig.1 과 같은 해석 모델로 단순화 할 수 있다. 나비에-스톡스 방정식(Navier-stokes equation)과 연속 방정식(Continuity equation)으로부터 식 (1)과 같이 얻어지는 레이놀즈 방정식은 초소형 외팔보와 바닥 사이에 있는 기체의 압력의 지배 방정식이다.

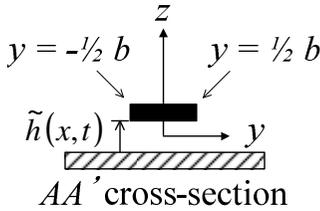
$$\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial y^2} - \frac{12G}{\eta P_a h^2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = \frac{12G}{h^3} \frac{\partial \tilde{w}_b}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\tilde{p}$  는 압력의 미소 변동량을 나타내고,  $P_a$  는 주위 압력(ambient pressure),  $\eta$  는 폴리트로픽 지수(polytropic exponent)이며,  $\tilde{w}_b$  는 외팔보의 횡방향 변위를 나타낸다. 희박 기체 상수(gas rarefaction coefficient)  $G$  는 레이놀즈 방정식을 유도하는 과정에서 사용된 가정에 따라 크게 4 가지 형태를 갖는다 (식 (2-4)참조).

† 교신저자; 정회원, 아주대학교  
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr  
Tel : 031-219-3659, Fax : 031-219-1611



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 1 Analysis model for a microcantilever under squeeze-film damping forces

$$\text{Case A: } G = \frac{\mu}{1 + 9.638 \cdot \text{Kn}^{1.159}} \quad (1)$$

$$\text{Case B: } G = \frac{\mu}{1 + 6\sigma_p \cdot \text{Kn}} \quad (2)$$

$$\text{Case C: } G = \mu / Q_{\text{pr}} \quad (3\text{-a})$$

$$Q_{\text{pr}} = \frac{12\mu_1(qh_0 - 2 \tanh(1/2 \cdot qh_0))}{j\omega\rho q h_0^3} \quad (3\text{-b})$$

$$\text{Case D: } G = \mu / Q_{\text{pr}} \quad (4\text{-a})$$

$$Q_{\text{pr}} = \frac{12\mu}{j\omega\rho h_0^3 q} \left[ \frac{qh_0 - (2 - q^2\sigma_p\lambda h_0)\tanh(qh_0/2)}{1 + \sigma_p\lambda q \tanh(qh_0/2)} \right] \quad (4\text{-b})$$

위에서 열거한 네 가지 경우의 외팔 기체 상수를 사용하여 계산된 기체 감쇠력이 외력으로 작용하는 초소형 외팔보의 주파수 응답함수를 모드 중첩법으로 얻었다.

$$H(x|\omega) = \frac{W_b(x|\omega)}{W_s(\omega)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n(\omega)}{W_s(\omega)} \Phi_n(x) \quad (5)$$

식 (5)를 사용하여 계산된 외팔보의 2차 고유 모드의 양질 계수(Quality factor)를 Fig. 2에서 비교

하였다.

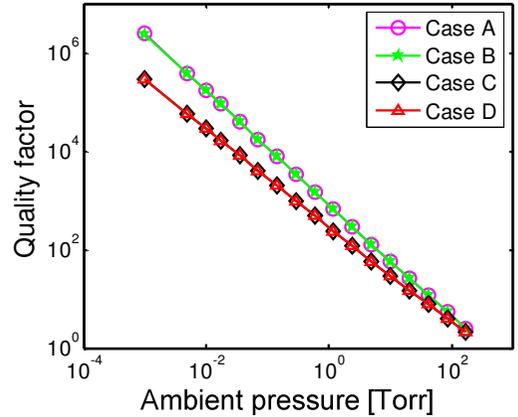


Fig.2 Quality factors of the 2<sup>nd</sup> mode for four cases

### 3. 결 론

관성력의 포함여부보다 기체의 미끄러짐 경계 조건 포함여부가 스퀴즈 필름 감쇠력에 의해 발생하는 감쇠(양질 계수)에 계산 결과에 더 큰 영향을 미쳤다.

### 후 기

이 논문은 2009학년도 아주대학교 정착연구비 지원에 의하여 연구되었고, 또한, 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과이기도 합니다.

### 참 고 문 헌

(1) Czaplewski, D. A., Dyck, C. W., Sumali, H., Massad, J. E., Kupperts, J. D., Reines, I., Cowan, W. D. and Tigges, C. P., 2006, A Soft-Landing Waveform for Actuation of a Single-Pole Single-Throw Ohmic RF MEMS Switch, Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 15, No. 6, pp. 1586~1594.

(2) Granaldi, A. and Decuzzi, P., 2006, The Dynamic Response of Resistive microswitches: switching time and bouncing, Journal of Micromechanics and Microengineering. Vol. 16, pp. 1108~1115.

(4) Bao, M. and Yang, H., 2007, Squeeze film air damping in MEMS, Sensors and Actuators A. Vol. 136, pp. 3~27.