J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(7), 523-528(2020)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.7.523
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

수평 구동형 MEMS 관성 스위치 설계 및 성능해석

김학성[1], 장승교[2]

Design and Performance Analysis of Lateral Type MEMS Inertial Switch

Hakseong Gim[1] and Seung-gyo Jang[2]
The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development

ABSTRACT

A lateral type MEMS inertial switch was designed on the same principle as spring-mass system. The MEMS switch is used for arming mechanism of the arm-fire device by sensing the applied acceleration. We analyzed the switching capability of the MEMS switch under various acceleration conditions via performance model. Simulation results showed that the MEMS switch works very well at 10 g when the applied acceleration slope does not exceed 10 g/msec. On the other hand, the threshold operating acceleration level simulation exceeded the requirement (10±2 g) due to the width and length of the spring by considering 10% tolerance of the design values. Design modification of doubling the width of the spring, which is difficult to reduce less than 10% tolerance in fabrication process, was proposed after confirming the simulation results comply the requirement.

초 록

스프링-메스 시스템의 원리를 이용하여 수평 구동형 MEMS 관성 스위치를 설계하였다. 본 MEMS 스위치는 외부에서 발생하는 가속도를 감지하여 점화안전장치를 장전시키는 역할을 한다. 성능 모델링을 통하여 다양한 가속도 조건에서의 구동 양상을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 가속도의 기울기가 10g/msec 이하인 경우에 MEMS 스위치는 10g에서 잘 작동하는 것으로 나타났다. 반면에, 설계 변수들의 공차를 10%로 고려한 시뮬레이션 결과 스프링 폭과 길이에 의해 임계 동작 가속도가 규격(10±2g)을 벗어났다. 제작 공정상 10% 이하의 공차 관리가 어려운 스프링 폭을 두 배로 늘렸을 때 규격을 만족하는 것을 확인하고 설계보완을 제안하였다.

Key Words : MEMS Switch(MEMS 스위치), Arm-fire Device(점화안전장치), Evaluation of Performance Parameter(설계 변수 영향성 평가), Modeling & Simulation(모델링 & 시뮬레이션)

Ⅰ. 서 론

MEMS 관성 스위치는 일반적인 MEMS 가속도계의 원리를 응용하여 만든 스위치로서 외부에서 인가되는 가속도를 감지하여 기계적인 스위칭을 발생시키는 장치이다. 일반적인 스프링-메스 시스템으로 구성되어있고 일정 값 이상의 가속도가 인가되면 관성질량의 운동에 의하여 스위치가 연결되고 가속도 값

† Received : August 28, 2019 Revised : May 25, 2020 Accepted : May 29, 2020
[1] Researcher, [2] Principal Researcher
[2] Corresponding author, E-mail : jsg4580@add.re.kr
© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

이 제거되면 스프링의 복원력에 의하여 스위치가 열려 본래 상태로 돌아가는 구조로 되어 있다. MEMS 관성 스위치는 스위칭을 인식하기 위하여 스위치 양단에 간단한 회로가 연결되지만 대부분 초소형 기계구조물로 이루어져 있기 때문에 MEMS 가속도계 보다는 전자파에 덜 민감하다. 또한 일정 수준의 가속도에 반응하여 스위칭이 이루어지고, 스위칭을 위한 추가 전원이 필요 없기 때문에 충돌을 감지하는 에어백의 트리거 장치나 비행체의 안전스위치 및 로켓 점화안전장치의 장전 스위치 용도로 활용이 가능하다.

MEMS 관성 스위치는 지난 수십 년 동안 다양한 방면으로 연구가 이루어졌는데[1-5] 관성 질량이 wafer 면에 대하여 움직이는 방향에 따라 수직 구동형과 수평 구동형으로 나눌 수 있고, 또 스위칭 임계 가속도의 크기에 따라 수십 g 이하일 경우 low-g, 수백 g 이상일 경우는 high-g로 구분하기도 한다. 많은 경우에 제작의 용이성과 스위칭 접점 설계의 단순함으로 인하여 수직 구동형 스위치에 대한 연구가 활발하여 이루어졌으나 low-g 스위치의 경우는 제작 공차에 대한 민감함 때문에 수평 구동형 스위치를 더 선호하는 추세이다. 또한 수직 구동형 low-g 스위치의 경우는 가속도가 인가되는 방향의 정확도에 따라 관성 질량의 기울어짐(tilting)이 발생할 가능성이 수평 구동형보다 높고 그 결과 스위칭이 다소 매끄럽지 못한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 유도무기 추진기관의 점화안전장치에 적용 가능한 수평 구동형 MEMS 관성 스위치를 설계하였다[6]. 유도무기의 성능 향상을 위하여 부품의 경량화 및 소형화가 요구되는데 점화안전장치용 MEMS 스위치는 이러한 요구에 부합하는 정밀 가공품이다. 점화안전장치의 장전 스위치는 추진기관의 점화를 제어하는 장치로서 cold launch 미사일의 경우는 사출 가속도를 감지하고, 다단 로켓의 경우 2단 로켓의 점화안전장치는 1단 로켓에 의해 발생하는 가속도를 감지하여 2단 로켓의 점화를 위한 장전 메커니즘으로 사용할 수 있다. 유도무기와 같이 단회적으로 사용하는 시스템에서는 MEMS 관성 스위치를 사용하는 것이 일반적인 가속도계를 사용하는 것보다 공간 활용성이 우수하고 훨씬 더 경제적이라고 볼 수 있다.

유도무기용 점화안전장치에는 일반적으로 low-g MEMS 스위치가 필요한데 선행연구를 통하여 프로토타입을 제작한 바 있다[12]. MEMS 스위치를 개발함에 있어서 시행착오를 줄이고 빠른 시간에 구현하기 위해서는 MEMS 스위치 설계 기술과 M&S 기술이 필요하다. 일반적으로 MEMS의 개략적인 형상은 ANSYS와 같은 상용해석 툴을 이용해서 결정할 수 있으나 설계 변경과 운동메커니즘을 이해하기 위해서는 적절한 성능 모델이 필요하다. 기존에는 수직 구동형 관성 스위치에 관한 성능 모델을 개발하고[7] 실험 결과와 비교하여 일치하는 것을 확인하였으나 모델에 대한 검증과 심층 분석이 이루어지지 않아 성능 모델을 설계 보완에 반영하기 어려웠다. 그러나 본 연구에서는 성능 모델을 통한 시뮬레이션을 통하여 설계변수의 영향성 및 제작 공차의 관리 등에 대하여 검토하였다. 특히 MEMS 제작 공정의 한계로 인하여 작동 규격을 만족시키기 어려운 설계변수인 스프링 폴에 대해서는 2배로 증가시켰을 경우 규격을 만족하는 것을 확인하고 설계 보완요소를 제안하였다.

II. 본 론

2.1 설계

수평 구동형 MEMS 관성 스위치는 Fig. 1과 같이 사각형의 형상을 갖는 관성질량(moving mass)의 네 귀퉁이에 스프링 역할을 하는 빔(folded beam)을 연결하여 각각 연결하였고 빔의 다른 끝단은 고정된 구조물에 연결하여 빔과 관성질량을 지지하도록 설계하였다. 또한 관성질량의 한 쪽에는 접점(contact electrode)을 설치하였고 질량체가 수 마이크로미터 움직이면 접점이 연결되어 스위칭 기능을 수행하도록 하였다. 관성질량의 좌우 측면에는 빗살 형태의 평판 빔을 설치하였는데 이는 질량체가 외부 충격에 의해 과도하게 반응하여 무리한 힘이 스프링이나 접점에 전달되지 않도록 하며 정상적인 가속도가 인가되었을 때에도 너무 빨리 반응하여 접점에서 반동이 생기는 chattering을 방지해 준다. 또한 평판 빔 사이에 고정된 빔을 설치하여 양단에 전극을 가할 경우 전기력을 이용하여 관성질량을 움직일 수 있으므로 반복구동을 통한 접점의 내구성을 확인하는 데도 활용할 수 있다.

각 구성품의 크기를 결정하기 위하여 우선 정해진 MEMS 패키지에 들어갈 만한 적당한 크기의 관성질량을 정한 후 원하는 동작가속도 규격을 만족하도록 스프링의 크기를 설정하였다. 이 때 ANSYS를 통한 해석 결과를 바탕으로 동작 유무를 확인하고 설계 변수를 확정하였다. 그 결과 MEMS 스위치의 크

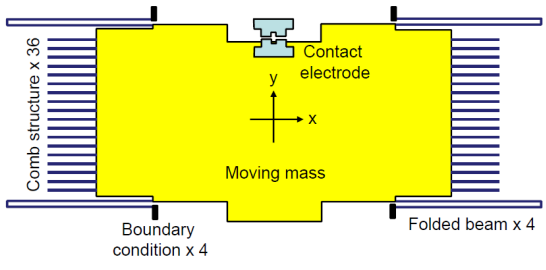

Fig. 1. Lateral MEMS Inertial Switch Design [8]

Table 1. Design values of MEMS Inertial Switch

Parameters	Value(㎛)
Spring Thickness (t)	70
width of the long beam (W)	6
length of the long beam (L)	925
Width of the folded part (W_{c2})	15
Length of the folded part (L_{c2})	42

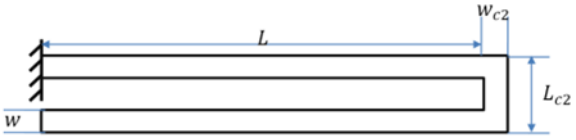

Fig. 2. Geometry of folded beam

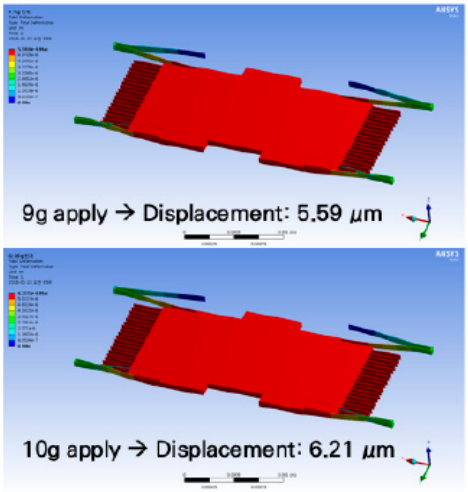

Fig. 3. Analysis of Moving Displacement

기는 Table 1과 같이 설계하였고 Fig. 2에는 스프링(Folded beam)의 형상을 나타내었다. 설계 결과를 확인하기 위하여 관성질량의 이동 거리를 계산하였고 10g 가속도에서 접점의 이격 거리인 6㎛를 초과하여 스위칭 되는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 성능 모델

관성 질량(m)의 운동은 식 (1)과 같이 외부에서 힘이 가해지는 스프링 메스 시스템의 운동방정식을 이용하여 기술할 수 있다.

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+b\frac{dx}{dt}+kx=ma(t)+f_e(x) \tag{1}$$

여기에서 b는 주로 관성 질량 양단에 설치된 평판

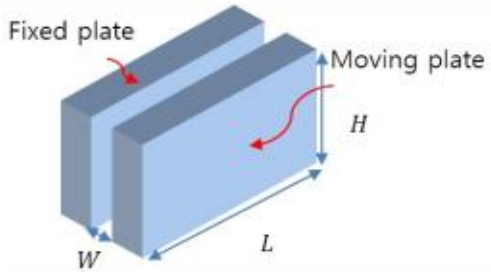

Fig. 4. Schematics of moving plate and fixed plate

빔에 의해 관성 질량의 움직임이 완화되는 정도를 표시하는 감쇄계수이고 k는 folded beam 스프링의 탄성계수이며 f_e는 스위치 접점 간에 발생하는 정전기력으로서 MEMS 스위치의 동작 상태를 확인하기 위해 인가되는 감지 전압(Vs)에 의해 발생하는 힘이다.

평판 빔에 의한 감쇄계수 b는 Fig. 4와 같이 관성 질량의 양단에 설치된 빔(Moving Plate)과 각 빔 사이에 설치된 고정 빔(Fixed Plate) 사이의 공기저항에 의해 주로 결정되는데 식 (2)와 같이 표현할 수 있다[9].

$$b_{M,N}=\sum_{m=odd}^{M}\sum_{n=odd}^{N}\frac{1}{Q_{pr}G_{m,n}+j\omega C_{m,n}} \tag{2}$$

여기에서 상대유동율 계수(relative flow rate coefficient) Q_{pr}과 $G_{m,n}$, $C_{m,n}$은 각각 식 (3)~(5)와 같이 표현된다.

$$Q_{pr}=\frac{1+6K_n}{1+jw\dfrac{\rho h^2(1+10K_n+30K_n^2)}{10\eta(1+6k_N)}} \tag{3}$$

$$G_{m,m}=\frac{\pi^6h^3(mn)^2}{768\eta LH}\left(\frac{m^2}{L^2}+\frac{n^2}{H^2}\right) \tag{4}$$

$$C_{m,n}=\frac{\pi^4h(mn)^2}{64P_aLH} \tag{5}$$

여기에서 Knudsen number (Kn)은 가스 분자의 평균 자유 경로 길이(mean free path length) λ를 평판 빔 사이의 거리 w로 나눈 값이며, ρ, h, η는 각각 평판 빔의 밀도(density), 점도(viscosity), 그리고 순간 위치(momentary position)이다. 그리고 L와 H는 각각 평판 빔의 길이와 높이이고, Pa는 대기압이다.

반면에 folded beam 스프링의 탄성 계수 k는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있는데[10],

$$k=\left[\frac{1}{Et}\left(\frac{L^3}{2W^3}+\frac{3(1+\upsilon)L}{5W}+\frac{L_{c2}}{4W_{c2}}-\frac{3LL_{c2}^2}{4W_{c2}^3}\right)\right]^{-1} \tag{6}$$

여기에서 E는 Young's modulus이고 υ는 Poisson ration이며 나머지 변수들은 Table 1과 Fig. 2에 표현되어 있다.

그리고 감지 전압(Vs)에 의해 스위치 접점에서 발생하는 정전기력 f_e는 다음과 같이 접점 사이의 거리(x)의 함수로 표현된다[11].

$$f_e(x) = -\frac{\epsilon A V_s^2}{2x^2} \quad (7)$$

여기에서 ε는 두 접점 사이의 유전율이고 A는 접점의 단면적이다.

2.3 성능 모델 분석

Table 2에 기술된 값들을 앞에서 구한 성능모델에 대입하면 관성 질량의 속도와 변위를 구할 수 있다.

서로 다른 기울기를 갖고 15g까지 도달하는 임의의 세 가지 경우의 가속도(Fig. 5)에 대하여 반응하는 관성질량의 속도와 위치는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 이 세 가지 경우는 실제로 MEMS 스위치가 적용되는 시스템에서 발생할 수 있는 가속도 프로파일을 가정한 것이다. 관성 질량의 움직임에 따라 스위칭 접점의 간격이 가까워지고 이 때 발생하는 정전기력은 Fig. 8과 같다.

Case 1과 3의 경우 관성 질량의 속도는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 가속도가 인가되는 초기에는 급격하게 증가하다가 공기 저항 및 스프링 탄성력에 의해 감속되고 스위칭 접점이 연결되는 순간 급격하게 감소하는 양상을 나타내었다. 가속도 증가 기울기가 급격할수록 초기 속도는 높은 값을 나타냈다. Case 2의 경우 최고 속도가 가장 높게 나타났고 다른 경우들과 다르게 스위칭 접점이 연결되는 순간에 속도

Table 2. Design Parameters and Values

Symbol	Description	Value
λ	mean free path length of a gas molecule	65.4 [nm]
R	gas constant	8.3144 [J/(mol • K)]
T	temperature	300 [K]
d	molecule diameter	375 [pm]
N_A	Avogadro number	6.02E23 [1/mol]
P_a	ambient pressure	101325 [Pa]
K_n	Knudsen number	0.0082
Q_{pr}	relative flow rate coefficient	1.0491
ρ	density of the fluid	1.138 [kg/m^3]
η	viscosity of the fluid	17.91E-6 [Pa/s]
W	gap distance	8 [μm]
H	height of the plate	70 [μm]
L	length of the plate	305 [μm]

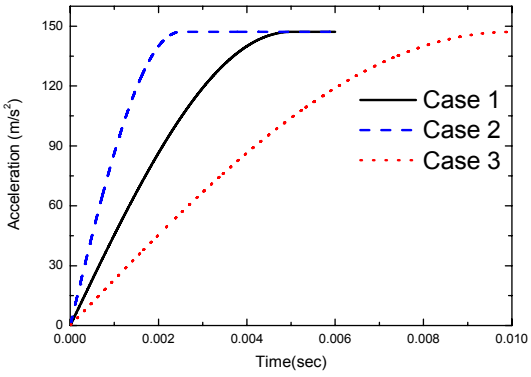

Fig. 5. Applied Acceleration Curves

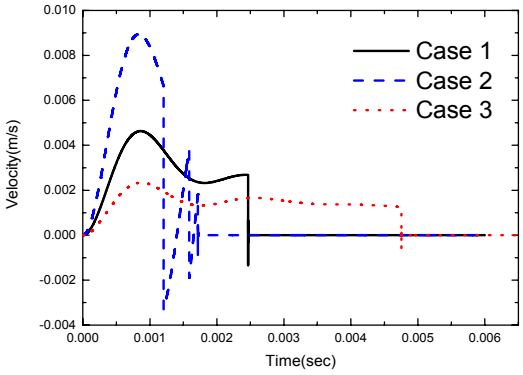

Fig. 6. Velocity of the Moving Mass

값이 오실레이션하는 현상이 발생하였는데 이는 성능 모델에서 접점의 충돌 시 탄성계수가 0.5인 충돌을 고려했기 때문이다. 이 때 Fig. 7의 관성 질량의 위치를 보면 접점이 단번에 붙지 않고 두 번 튄 후에 연결이 된 것을 확인할 수 있고 따라서 정전기력도 3회 발생하는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

관성 질량의 위치는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 비교적 완만하게 증가하다가 이동 거리가 6㎛에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 도달 시간은 Case 2의 경우에 1.725ms로 가장 짧고 이 때 가속도는 약 13.3g로 다른 두 경우들보다 높게 나타났다. 이와 같이 높은 임계가속도가 관측된 이유는 chattering에 의해

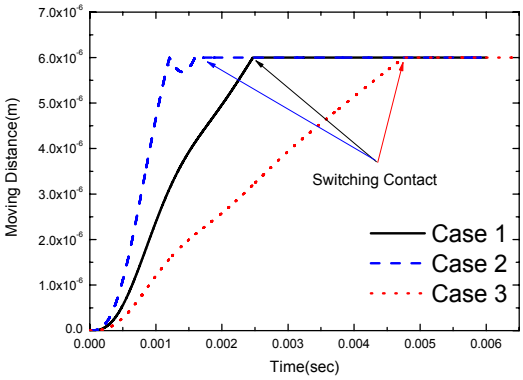

Fig. 7. Moving Distance of the Moving Mass

접점 스위칭이 지연되면서 발생하는 현상으로 이 경우에 처음으로 스위칭이 이루어진 시점에서의 가속도는 다른 경우와 유사하게 10g 내외의 값을 나타낸다. Case 1의 경우는 약 2.46ms 시점에 접점이 연결되고 멈추었다. 이 때 동작 가속도는 약 10.5g이고 점점의 Chattering은 발생하지 않았다. 점점 사이의 정전기력은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 스위칭이 이루어지는 시점에 급격하게 증가하였다가 감소하는 것으로 나타났다. 접점 간격이 가까워짐에 따라 정전기력이 무한대로 발산하는 것을 방지하기 위하여 일정거리(수 nm)에 도달하면 정전기력이 발생하지 않는 것으로 가정하고 계산하였다. 케이스에 따라 정정기력의 최대값이 차이를 보이는 이유는 계산 시 시간 스텝을 1 마이크로초로 제한한 것에 기인한 것으로 판단된다.

인가되는 가속도의 기울기에 따라 가속도 스위치의 속도와 Chattering의 영향에 의해 동작 가속도가 변화가 생기게 되는데 이를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다. 스위치 동작시간이 증가할수록 동작 가속도는 약 10g에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3의 ANSYS 정적해석 결과와 유사하며, 실제로 Rate Table을 이용하여 실험한 결과와도 유사하다.

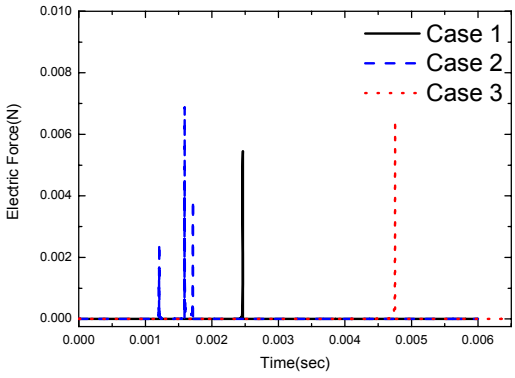

Fig. 8. Electrostatic Force between the Contacts

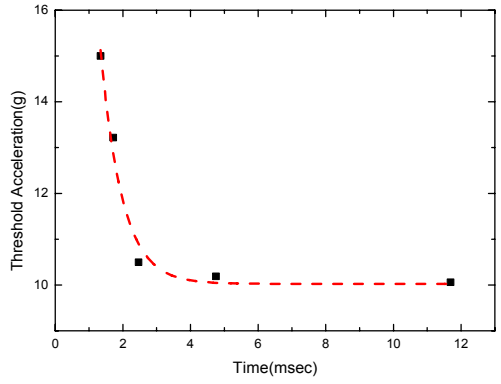

Fig. 9. Threshold Acceleration of MEMS switch (Dashed line is an exponential decay curve fitting)

Rate Table을 이용하여 제작된 MEMS 스위치를 이용하여 동작 가속도를 측정할 때에는 장비 특성상 가속도 값을 비교적 완만하게 증가시킬 수 있었고 스위치의 작동시간은 약 300 msec 정도가 되었다.

2.4 설계 변수 영향성 평가

MEMS 관성 스위치를 설계할 때 미세 가공구조물의 가공 치수의 오차를 감안하여야 한다. 왜냐하면 일부 구성품은 그 크기가 수 마이크로 단위로 제작되기 때문에 작은 오차에도 불구하고 스위치 동작 특성에 영향을 줄 수 있다. 특히 본 스위치와 같이 스프링의 폭이 6㎛인 경우는 제작 공정상 발생할 수 있는 기본적인 오차인 1㎛를 감안하면 설계 값의 약 17%에 해당되고 이는 스위치의 작동 가속도에도 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 이 밖에도 접점 간극이나 관성 질량의 무게 및 관성 질량의 측면에 가공되어 있는 평판 빔의 개수 등도 가속도 감지 성능에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 각 설계변수의 영향성을 판단하기 위하여 Fig. 10과 같이 5개의 설계 변수의 기준 값에 대하여 ±10%가 변할 경우 동작 가속도에 미치는 영향을 앞에서 구한 성능 모델을 이용하여 살펴보았다. 비교를 위하여 Fig. 9에서 동작 가속도가 10g에 수렴하는 상태로 판단되는 조건(작동시간 약 12 msec)을 기준으로 삼았다.

5개의 변수 중에 스프링 폭과 길이가 가장 민감한 것으로 나타났고 스프링 두께와 관성 질량의 무게 및 접점 간극은 유사한 수준의 민감도를 가지고 있는 것으로 나타났다. 가속도 스위치의 설계 규격을 10±2g으로 정할 경우 스프링 폭과 스프링 길이의 변량이 10%일 경우 규격을 벗어나고 나머지 변수들은 규격 값을 만족하는 것으로 나타났다. 여기에서 스프링의 길이는 925㎛로 10% 미만의 공차로 관리하는데 큰 문제가 없지만 스프링 폭의 경우 6㎛의 10%인 ±0.6㎛ 이하로 관리하는 데는 다소 무리가 따를 것으로 보여진다. MEMS 제작 공정상 발생하는 공차를 ±0.6㎛로 가정할 경우 스프링 두께의 산포로 인하여 적지 않은 불량률이 발생할 것으로 예상된다.

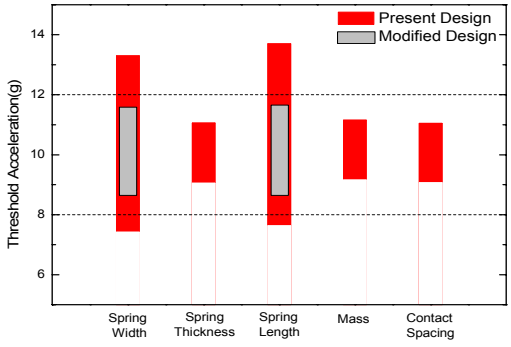

Fig. 10. Threshold Acceleration versus 10% variation of the design variables (dashed lines are design tolerance)

설계된 관성 스위치의 수율을 높이기 위해서는 스프링 폭을 현재 설계보다 증대시키고 비례적으로 관성 질량을 증가시키면 가능할 것으로 판단하여 12±0.6㎛의 스프링 선폭에 대하여 성능 모델을 이용하여 계산한 결과 Fig. 10의 Spring width 칼럼에 표현된 것과 같이 기존 모델에 비하여 임계 가속도의 변량 폭이 줄어들어 규격 범위 내에 든 것을 확인할 수 있었다. 이 때 관성 질량의 무게는 기존 설계보다 약 9.3배 증가하였다. 비교를 위하여 스프링 길이는 5%의 공차로 관리하는 것으로 설계 변경하여 Fig. 10에 표현하였다.

Ⅲ. 결 론

점화안전장치에 적용하기 위하여 수평 구동형 MEMS 관성 스위치를 설계하였다. 스프링-메스 시스템의 원리를 응용하면 MEMS 스위치를 구현할 수 있다. 그러나 처음 설계할 때 어느 정도의 메스를 설계할 것인가를 결정하기는 쉽지 않다. 원하는 임계 가속도에서 동작하는 스위치를 설계하기 위해서 정해진 메스에 해당되는 스프링을 설계하면 되지만 과연 메스의 크기를 얼마로 할 것인가를 결정하는 것은 많은 시행착오를 겪어야만 한다.

본 연구에서는 기존 경험에 근거하여 메스의 크기를 정했고 원하는 임계 가속도에서 동작하도록 스프링의 크기를 결정하였다. 스위치의 성능을 모사하기 위하여 성능 모델을 만들었고 다양한 가속도 조건에서 스위치의 구동 양상을 살펴보았다. 가속도가 매우 급격하게 증가하지 않는 조건에서 MEMS 스위치는 Chattering이 없이 10g 내외에서 잘 동작하는 것으로 모사되었다.

그러나 설계 변수의 민감도를 모사해본 결과 스프링 폭의 편차에 따라 스위치 동작 가속도가 규격 한계치를 벗어나는 것을 발견하였다. 이를 보완하기 위해 스프링 폭을 두 배로 늘렸을 때 동작 가속도 성능이 규격을 만족하는 것을 확인함으로써 설계보완을 제안하였다.

References

1) Matsunaga, T. and Esashi, M., “Acceleration Switch with Extended Holding Time using Squeeze Film Effect for Side Airbag Systems,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 100, Issue 1, August 2002, pp. 10~17.

2) Currano, L. J., Yu, M. and Balanchandran, B., “Latching in a MEMS Shock Sensor: Modeling and Experiments,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 159, Issue 1, April 2010, pp. 41~50.

3) Greywall, D. S., “MEMS-Based Inertial Switch,” *U.S. Patent,* 7,218,193, 15 May 2007.

4) Gerson, Y., Schreiber, D., Grau, H. and Krylov, S., “Meso Scale MEMS Inertial Switch Fabricated using an Eletroplated Metal-on-Insulator Process,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 24, No. 2, January 2014, pp. 405~412.

5) Xu, Q., Sun, B., Li, Y., Xiang X., Lai, L., Li, J., Ding, G., Zhao, X. and Yang, Z., “Design and Characterization of an Inertial Microswitch with Synchronous follow-up Flexible Compliant Electrodes capable of Extending Contact Duration,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 270, February 2018, pp. 34~45.

6) Jang, S. G., Hwang, J. and Park, C., “MEMS Switch Assembly for Safety and Arming Device in Rocket,” *R.O.K. Patent*, KR101772087B1, 2017.

7) Hwang, J., Ryu, D., Park, C., Jang S. G., Lee, C. I. and Kim, Y. K., “Design and Fabrication of a Silicon-based MEMS Acceleration Switch Working lower than 10g,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 27, No. 6, May 2017, 065009 (9pages).

8) Kansal, P., Kasturi, P., Kim, N. H. and Jang, S. G., “Sensitivity-Based Reliability Analysis of MEMS Acceleration Switch,” *Modern Applied Science*, Vol. 11, No. 10, September 2017, pp. 123~136.

9) Mol, L., Rocha, L. A., Cretu, E. and Wolffenbuttel, R. F., “Squeezed Film Damping Measurements on a Parallel-Plate MEMS in the Free Molecule Regime,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No. 7, June 2009, 074021(6pp).

10) Wai-Chi, W., Azid, A. A. and Majlis, B. Y., “Formulation of Stiffness Constants and Effective Mass for a Floded Beam,” *Archives of Mechanics,* Vol. 62, No. 5, 2010, pp. 405~418.

11) Luo, J. K., et al., “Uniformity Control of Ni Thin-Film Microstructures deposited by Through-Mask Plating,” *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 152, No. 1, 2005, pp. C36~C41.

12) Lee, H. N., Jang, S. G., Lee, S., Lee, J. S. and Hawang, Y. S., “MEMS Inertial Switch for Military Applications,” *Proceedings of eurosensors 2017 Conference*, 1, 343, 2017, pp. 1~5.