
MEMS 소자에서의 비선형 현상

김주완* · 구영덕** · 배영철***

Nonlinear Phenomena in MEMS Device

Ju-Wan Kim* · Young-Duk Koo** · Young-Chul Bae*

요약

본 논문에서는 MEMS에서 비선형적인 특성을 확인하기 위하여 Duffing 방정식을 가지는 MEMS 시스템을 제안하고 여기에 다른 종류의 비선형 항을 삽입하였을 때의 비선형 현상을 분석하였다. 검증 방법으로 파라미터 변화에 의한 카오스 운동이 있음을 시계열 데이터, 위상 공간, 전력 스펙트럼을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose the MEMS system with Duffing equation to confirm nonlinear features in MEMS system. We also analyze nonlinear phenomena when adding the nonlinear term of another type. As a verification, we confirm chaotic motion by parameter variation through the time series, phase portrait and power spectrum.

키워드

Chaos, Nonlinear Dynamics, MEMS, vibration signal, Duffing equation
카오스, 비선형 동적 시스템, MEMS, 진동 신호, Duffing 방정식

1. 서론

최근에 MEMS(Microelectromechanical system)와 비선형 시스템에 대한 연구[7-8]에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. MEMS은 마이크로 단위의 초소형 소자에 전기와 기계적 소자를 가지고 있는 초소형 시스템을 말한다. 시스템 자체가 마이크로 미만의 초소형 소자이기 때문에 MEMS 적용한 초소형 소자는 앞으로 많은 연구가 진행될 것으로 보이며 이를 이용하여 다양한 전원[5-6]에 이용할 수 있다.

MEMS 시스템은 시스템 자체가 마이크로 또는 나노 단위의 초소형의 형태를 가지고 있어서 사람의

눈으로 내부 동작을 확인하는 것은 어렵다고 보고 있다. 이러한 이유로 MEMS 내부 동작에 대한 연구가 그동안 관심의 영역 밖에 있었다.

최근에 MEMS에서 직접 전원을 발생시키도록 MEMS 내부에서 카오스적인 진동현상[2] 있음을 연구한 결과가 있었으나 MEMS에서 카오스 현상에 해석 중에서 파라미터 값의 변화에 의한 정확한 해석을 내놓지 못한 문제점을 가지고 있다. 또한 MEMS 시스템에서 Duffing 시스템 내에 진동 신호를 발생시키고 이 신호에서 카오스적인 신호가 있음을 시계열, 위상공간, 전력 스펙트럼, 포엔카레 맵을 통하여 증명한 연구도 있었다[3].

* 전남대학교 대학원 전기 및 반도체공학과(lighttruth@daum.net)

** 한국과학기술정보연구원(ydkoo@kisti.re.kr), *** 교신저자 : 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터 공학부(ycbae@jnu.ac.kr)

접수일자 : 2012. 10. 27

심사(수정)일자 : 2012. 10. 02

게재확정일자 : 2012. 10. 05

지금까지 연구한 Duffing 방정식의 경우 비선형 요소와 외부에서 인가한 힘에 의해 다양한 형태의 비선형 특성이 존재하나 이에 대한 연구가 부족한 상황이었다.

본 논문에서는 MEMS에서 비선형적인 특성을 확인하기 위하여 Duffing 방정식을 가지는 MEMS 시스템을 제안하고 여기에 다른 종류의 비선형 항을 삽입하였을 때의 비선형 현상을 분석하였다. 검증 방법으로 파라미터 변화에 의한 카오스 운동이 있음을 시계열 데이터, 위상 공간, 전력 스펙트럼을 통하여 확인하였다

II. MEMS 회로

2.1 Duffing 방정식[9]

MEMS에서 비선형 특성을 구하기 위해 일반적인 비선형 스프링 힘을 가진 그림 1 및 식(1)과 같이 표현되는 Duffing 방정식이라 불리는 비선형 동역학 시스템을 생각해 보자. 이 방정식은 식(1)과 같이 좌변에 3차원의 형상을 나타내는 βx^3 항이 비선형 특성을 좌우하는 힘을 가지고 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \beta x^3 = f_0 \sin \omega t \quad (1)$$

여기서 m 은 질량, k 는 스프링 계수, c 는 s는 강성을 나타낸다. β 는 비선형성의 세기를 나타낸다.

식(1)의 좌변은 2차 항을 가진 시스템으로서 카오스적인 거동을 나타낼 수 있는 기본적인 요소인 시스템이 3차계 이상이며 비선형 요소를 가져야한다는 사실에 미흡하다. 비선형적인 요소는 존재하나 시스템이 2차계로서 이 시스템에서는 카오스적 거동을 찾을 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 우변에 강제적인 힘을 가하여 비자율(nonautonomous) 시스템을 구성하여 3차 시스템을 만들게 된다.

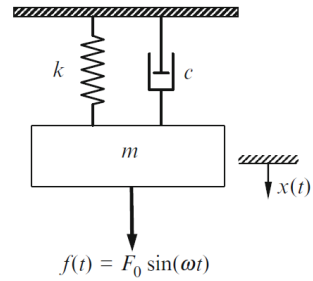


그림 1. Duffing 방정식의 모델
Fig. 1 Model of Duffing equation

2.2 MEMS 발진기[2,16]

MEMS 발진기는 식(2)와 같이 간단한 스프링-질량 시스템으로 모델링 될 수 있다. 식(2)로 표시하는 MEMS 시스템은 식(1)로 표시하는 Duffing 방정식과 동일한 모델이라고 볼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \Psi = F(x, V) \quad (2)$$

여기서, 현실적인 MEMS 설계에 기반하여 사용할 수 있는 파라미터 선정하였으며 그 값은 질량 $m = 2.3 \times 10^{-9} \text{ kg}$, Ψ 는 비선형 항으로 다양한 형태로 구성될 수 있다. 전기적인 힘 $F(x(t), V(t))$ 는 시간 t , 변위 x , 여기전극전압(excitation electrode voltage) V 의 함수를 나타낸다.

2.3 비선형 함수[16]

식(2)의 비선형 함수는 포텐셜 에너지 함수라고하며 다양한 형태로 구성할 수 있다. 본 논문에서는 비선형 항을 표준형인 식(3)과 같은 형태를 적용한다.

$$\begin{aligned} \Psi = U(x) &= \frac{\partial}{\partial x} [kx^2 + (ax^2 + b\Delta^2)^{-\frac{3}{2}} + c\Delta^2] \\ &= 2kx + \left[\frac{-\frac{3}{2}(ax^2 + b\Delta^2)^{\frac{1}{2}} 2ax}{(ax^2 + b\Delta^2)^3} \right] \\ &= -3ax(ax^2 + b\Delta^2)^{-\frac{5}{2}} + 2kx \end{aligned} \quad (3)$$

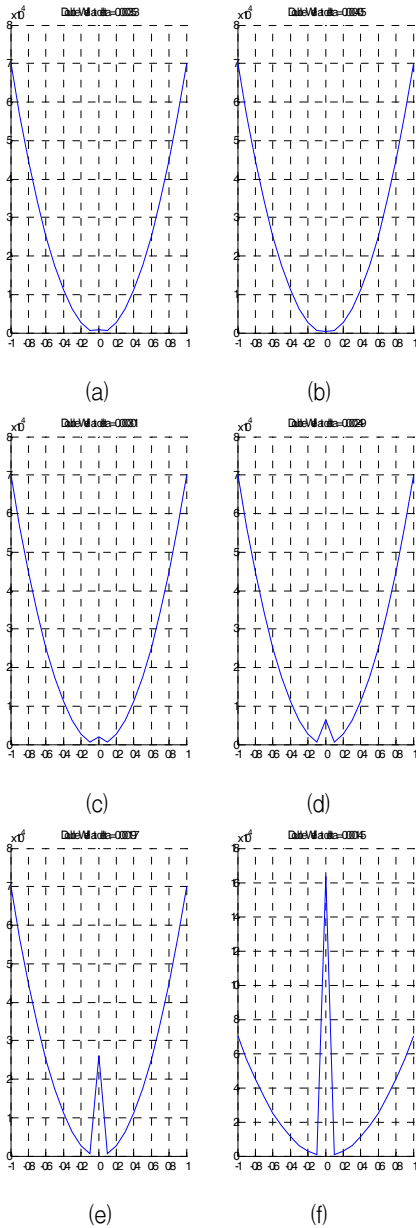


그림 2. 비선형 함수
Fig. 2 Nonlinear function

식(3)에 의한 비선형 항인 퍼텐셜 함수는 그림 2와 같이 파라미터에 값인 Δ 에 따라 다양하게 나타낼 수 있다. 일반적으로 2(a)를 단일 우물 구조라고 하고 2(b)-2(g)를 이중 우물 구조라고 한다. 2(a)와 같은 단

일 우물 구조에서는 거의 거의 선형적으로 응답하므로 비선형적인 전체 시스템에서 비선형성이 강하지 못하지만 2(b)-2(g)를 적용하면 비선형성이 강한 2(e)-2(f)를 적용하면 비선형 진동을 쉽게 얻을 수 있다.

2.4. 전기적인 힘[1,2,16]

식(2)의 MEMS 설계 전기적인 힘은 식(4)와 같이 정의[1,2]하여 사용하거나 식(5)과 같이 정현파 또는 다른 파형을 이용하여 사용한다.

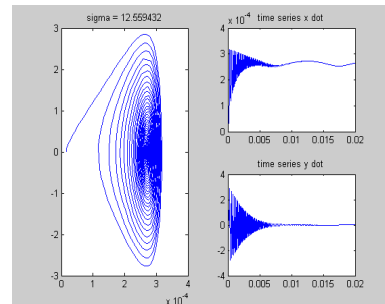
$$F(x) = kV_1^2 u(x) - kV_2^2 u(-x) \quad (4)$$

$$F(x) = \sigma \sin \omega t \quad (5)$$

III. 파라미터 변화에 의한 비선형 특성

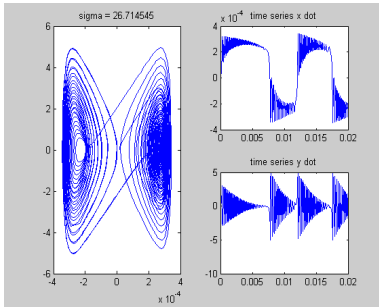
3.1 외부 신호 진폭 σ 변화에 의한 카오스 현상

MEMS 시스템에서의 비선형 특성인 카오스 특성을 확인하기 위하여 파라미터 변화에 의한 식(2), 식(3), 식(5)을 이용하여 식(5)의 외부에서 인가한 힘의 진폭을 변화시켰을 때의 시계열 데이터와 위상 공간을 통하여 비선형 특성인 카오스 운동이 있음을 확인하였다.

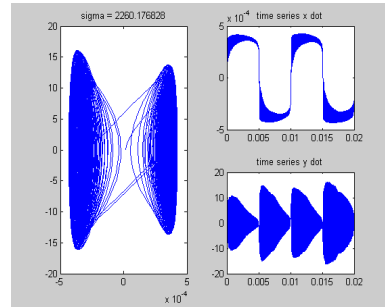


(a) $\sigma = 12.55$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)

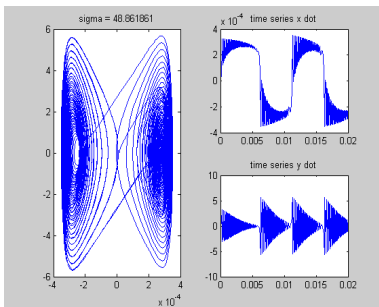
(a) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 12.55$



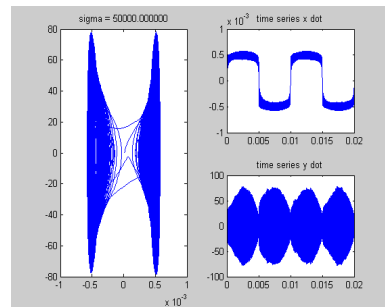
(b) $\sigma = 26.71$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (b) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 26.71$



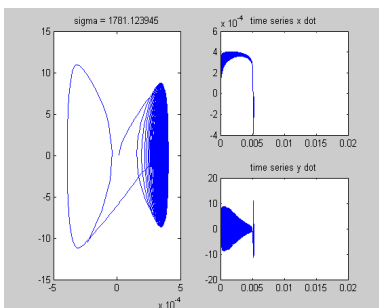
(d) $\sigma = 2260$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (d) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 2260$



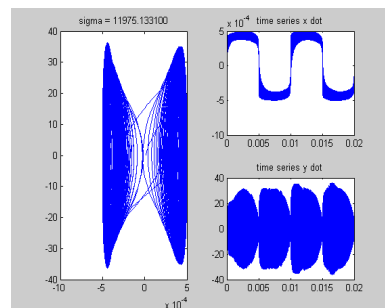
(c) $\sigma = 48.86$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (c) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 48.86$



(e) $\sigma = 5000$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (e) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 5000$



(d) $\sigma = 1781$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (d) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 1781$



(f) $\sigma = 11975$ 일 때의 위상 공간(왼쪽)과 시계열 데이터(오른쪽)
 (f) Phase plane(left) and time-series(right) when $\sigma = 11975$

그림 3. σ 의 값을 변화시켰을 때의 시계열 데이터와 위상 공간

Fig. 3 Time-series and phase plane when σ value varied

그림 3에서 보는 바와 같이 다양한 어트랙터를 볼 수 있으며 이를 통하여 카오스적인 특성이 있음을 확인할 수 있다.

3.2 전력 스펙트럼을 통한 카오스 현상 해석

식(2), 식(3), 식(5)을 이용하여 전력 스펙트럼을 구한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 전력 스펙트럼을 보면 스펙트럼 대역이 전대역에 걸쳐 나타난 것을 알 수 있으며 이는 카오스 현상이 있음을 나타내는 일반적인 특성임을 알 수 있다.

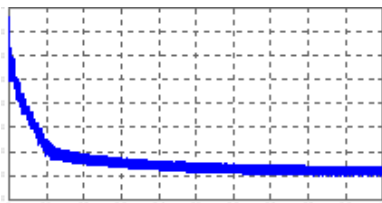


그림 4. 전력 스펙트럼
Fig. 4 Power spectrum

V. 결론 및 향후 과제

Duffing 시스템으로 구성되는 MEMS 시스템에서 카오스적인 거동을 확인하기 위한 방법을 제시하였다. 이를 위해 이중 우물모로 구성하는 비선형 항을 삽입하고 또한 주기 운동을 외부의 힘으로 입력하여 이 주기 운동에서 진폭 값인 σ 파라미터 변화에 의해 시계열 데이터와 위상 공간의 변화를 살펴보았다. 또한 전력 스펙트럼의 주파수 상태를 통하여도 카오스 거동이 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] S. G. Adams, "Design of electrostatic actuators to tune MEMS," Ph.D. dissertation, Cornell Univ., Ithaca, NY, May 1996.
[2] Yongmei Cindy Wang, Scott G. Adams, James S. Thorp, Noel C. MacDonald, Pete Hartwell,

and Fred Bertsch, "Chaos in MEMS, Parameter Estimation and Its Potential Application", IEEE. trans. Circuit and System, Vol. 45, No. 10, pp. 1013-1020, 1998.

- [3] 배영철, "Duffing 방정식을 가진 MEMS에서의 카오스 현상", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 709-716, 2011.
[4] K. Shaw, Z. Zhang, and N. MacDonald, "SCREAM I: A single mask, single crystal silicon process for microelectromechanical structures", MEMS'93, pp. 155 - 160, 1993.
[5] 박나연, 손철수, 김원중, "모바일 센서 네트워크에서 효율적인 노드 위치 결정", 한국전자통신학회논문지, 5권, 4호, pp. 391-398, 2010.
[6] 강희훈, 이영중, 한완옥, "유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 에너지-효율적인 계층 구조 클러스터 기반 라우팅 기법", 한국전자통신학회논문지, 4권, 3호, pp. 243-246, 2009.
[7] 손영우, 배영철, "하드웨어 구현에 의한 카오스 어트랙터 생성용 Chua 회로에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 5권, 2호, pp. 158-163, 2010.
[8] 손영우, 배영철, "L 성분이 없는 간략화 CHUA 회로 구현에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 5권, 1호, pp. 17-22, 2010.
[9] G. Duffing, *Erzwungene Schwingungen bei Veränderlicher Eigen Frequenz und ihre Technische Bedeutung*, Vieweg, Braunschweig, 1918.
[10] J. M. T. Thompson and H. B. Stewart, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, John Wiley, Singapore, 1988.
[11] M Lakshmanan, K Murali, "Chaos in Nonlinear oscillators", World scientific, 1995.
[12] S. Parthasarathy and M. Lakshmanan, *J. Sound Vib. Vol. 137*, pp. 523-526, 1990.
[13] A. H. Nayfeh and D. T. Mook, *Nonlinear Oscillations*. John Wiley, New York, 1979.
[14] J. Guckenheimer and P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. New York, NY: Springer-Verlag, 1983.
[15] F. C. Moon and P. Holmes, "A magnetoelastic strange attractor," *J. Sound Vib.*, Vol. 65, No. 2, pp. 285-296, 1979.
[16] B. Ando, S. Baglio, C. Trigona, N. Dumas, L. Latorre and P. Nouet, "Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting application", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 20, 125020, 2010.

저자 소개



김주완(Ju-WAN KIM)

1998년 2월 순천대학교 전자공학과(공학사)

2001년 2월 여수대학교 전기공학과(공학석사)

2005년~현재 : 전남대학교 전기공학과 박사과정

※ 관심분야 : 카오스, 비밀통신, 비선형 제어



구영덕(Jong-Kyu Park)

1988년 2월 인천대학교 기계공학과(공학사)

1990년 2월 인천대학교 기계공학과(공학석사)

1998년 2월 인천대학교 기계공학과(공학박사)

1991년~현재 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원

※ 관심분야 : 미래 유망기술, 계량정보분석, 기술시장분석



배영철(Young-Chul Bae)

1984년 광운대학교 전기공학과(공학사)

1986년 광운대학교대학원 전기공학과(공학석사)

1997년 광운대학교대학원 전기공학과(공학박사)

1986년~1991년 한국전력공사

1991년~1997년 산업기술정보원 책임연구원

1997년~2006년 여수대학교 전자통신전기공학부 부교수

2002년~2002년 Brigham Young University 방문교수

2006년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수

2011년~2011년 University of Utah 방문교수

※ 관심분야 : Chaos Control and Chaos Robot, Robot control etc.