레이저 간섭계를 이용한 적층 마이크로 외팔보의 고유진동수 측정

김 윤 영¹ · 한 봉 구^{2*}

¹동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, ²서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Measurement on the Natural Frequency of a Laminated Cantilever Microbeam using a Laser Interferometer

Yun-Young Kim¹ and Bong-Koo Han^{2*}

¹Division of Mechanical, Automotive and Robot Component Engineering, Busan, 47340, Korea

²Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 01811, Korea

Abstract

The natural frequency of a laminated cantilever microbeam was studied in the present investigation. The microbeam was made of quartz on a silicon chip, and its top and bottom surfaces were coated with thin (~30nm) gold films. An ultrasonic testing platform was employed to resonate the microbeam, and its time domain signal was optically measured. The natural frequency was quantified through the fast Fourier transform of the waveform, and the result showed good agreement with a theoretical estimation from the classical beam theory. This study is expected to provide a dynamic evaluation technique for micro/nanoscale materials and micromechanical structures.

Keywords : laminate cantilever microbeam, natural frequency, laser interferometer, beam theory

1. 서 론

마이크로/나노공학 기술은 미래 융복합 첨단 산업을 성장시킬 수 있는 핵심 요소이기 때문에 그 중요성이 날이 부각되고 있다. 그 중에서도 최근 급속히 발전하고 있는 MEMS (microelectromechanical systems) 기술은 미세 가공 공정을 이용하여 실리콘 기판 위에 마이크로미터 크기의 구조물을 형성함으로써 나노 재료, 생체 분자 및 DNA 등의 특성을 연구할 수 있는 방법을 제공한다. 예를 들어, 마이크로 외팔보를 이용한 측정법은 외팔보의 표면에 물질이 흡착될 때 발생하는 변위나 공진주파수의 변화로부터 해당 물질의 특성을 파악하는 방법으로, 기존의 분석 기술보다 우수한 민감도와 경제성, 그리고 시험의 용이성 등의 장점을 가지므로 최근 마이크로/나노 공정 기술의 발달과 함께 여러 분야에서 나노스케일 물질의 검출 및 평가에 응용이 되고 있다(Na *et al.*, 2013).

마이크로 외팔보는 일반적으로는 실리콘 재질로 만들어지지만,

활용 목적에 따라 질화 규소(Si₃N₄)와 같은 세라믹 재료(Al *et al.*, 2011)나 알루미늄(Comella and Scanlon, 2000) 혹은 크로뮴(Bourouina *et al.*, 2016)과 같은 금속 재료로 제작되기도 한다. 특히, 이산화 규소(SiO₂) 재질의 마이크로 외팔보를 사용하면 실리콘 대비 낮은 탄성계수로 인하여 더욱 큰 변위를 얻을 수 있으므로 검출 민감도를 향상시킬 수 있다(Tang *et al.*, 2004). 하지만, 이는 가시광선 및 근적외선 파장의 빛에 대하여 매우 낮은 반사도를 갖기 때문에 광학적 측정을 위하여 표면에 금과 같은 금속 박막의 증착을 요구한다. 이처럼 마이크로 외팔보가 적층 보의 구조를 갖게 되면 유요 굽힘강성 및 질량의 변화에 따라 그 동적 거동이 달라지므로, MEMS 센서로 활용하기 위하여 고유진동수와 진동 모드 등을 정확히 측정하고 분석할 수 있는 기술이 필요하다.

또한, 기존의 연구에서는 많은 경우 PSD(position sensitive detector)를 사용하여 마이크로 외팔보의 변위를 측정하였다(Tang *et al.*, 2004; Shu *et al.*, 2007). 하지만, 센서의

* Corresponding author:

Tel: +82-2-970-6577; E-mail: bkhan@snu.ac.kr

Received August 20 2017; Revised December 5 2017;

Accepted December 6 2017

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분해능을 향상시키기 위하여 작동 주파수 대역을 kHz에서 MHz 대역으로 증가시킬 경우 신호대 잡음비의 감소로 측정이 어려워지는 문제점이 있다(Enning *et al.*, 2011). 만일 이를 해결하기 위하여 광경로를 증가시키고자 한다면 프로브 헤드(probe head)의 부피가 커지고 구조가 복잡해진다(Kim and Lee, 2012).

따라서, 본 연구에서는 마이크로 적층 보의 동적 특성을 평가하고자 한다. 즉, 초음파 평가법을 활용하여 마이크로 적층 보의 고유진동수를 측정하고, 그 결과를 오일러-베르누이 보 이론으로부터 구한 이론해와 비교함으로써 실험 결과의 타당성을 검증하고자 한다. 아울러, 레이저 간섭계로 이루어진 광학 수신부를 구성하여 고주파수 영역대에서 작동하는 마이크로 외팔보의 신호를 검출함으로써 기존의 PSD 기반 측정법의 한계를 극복할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론

오일러-베르누이 보 이론(Landau and Lifshitz, 1970)에 따르면 Fig. 1과 같이 정의된 좌표계에서 임의의 시간 t 에서 외팔보 길이방향으로의 지점 x 의 횡방향 변위 $w(x, t)$ 에 대한 운동방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \lambda_m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

이 때, E 는 보의 탄성 계수를, I 는 단면 이차 모멘트를, 그리고 λ_m 은 외팔보의 선형질량밀도를 뜻한다. 또한, EI 는 굽힘 강성계수를 의미하며, λ_m 은 밀도 ρ 와 단면적 A 의 곱으로 나타낼 수 있다($\lambda_m = \rho A$).

운동방정식을 풀기 위하여 변수분리법을 적용하여 해를 $w(x, t) = X(x)T(t)$ 의 형식으로 표시하고 식 (1)에 대입하면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{EI}{\lambda_m X(x)} \frac{\partial^4 X(x)}{\partial x^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = w_n^2 \quad (2)$$

Fig. 1 The definition of a coordinate system for a cantilever beam

이 때, w_n 은 각속도(rad/s)를 뜻한다. 이로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k_n^4 X = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서 k_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$k_n^4 = \frac{\omega_n^2 \lambda_m}{EI} \quad (4)$$

따라서, 외팔보의 n 차 모드 고유진동수는 다음과 같이 결정된다.

$$f_n = \frac{(k_n L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\lambda_m}} \frac{1}{L^2} \quad (5)$$

여기서, 자유단-고정단(free-clamped) 경계조건을 갖는 외팔보에 대하여 $k_1 L = 1.875$, $k_2 L = 4.694$, $k_3 L = 7.855$ 등의 값을 갖는다(Landau and Lifshitz, 1970).

만일, 다층 구조를 갖는 외팔보의 단면이 Fig. 2와 같다면 굽힘강성(EI)은 각 층의 탄성계수 E 와 단면 이차 모멘트 I 를 고려한 등가 굽힘강성 $(EI)_{eq}$ 로 대체되어야 한다. 즉,

$$(EI)_{eq} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 \quad (6)$$

각 층의 단면 이차 모멘트는 평행축 정리를 사용하여 나타내면 다음과 같다(Cortés and Sarria, 2015).

$$I_1 = \frac{1}{12} b H_1^3 + b H_1 \left(h_n - \frac{H_1}{2} \right)^2 \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} b H_1^3 + b H_2 \left(H_1 + \frac{H_2}{2} - h_n \right)^2 \quad (8)$$

Fig. 2 A schematic of the cross-section of a laminated cantilever beam

$$I_3 = \frac{1}{12} b H_3^3 + b H_3 \left(H_1 + H_2 + \frac{H_3}{2} - h_n \right)^2 \quad (9)$$

이 때, b 는 외팔보의 너비이다. 또한 중립축 h_n 은 아래와 같이 기술된다.

$$h_n = \frac{E_1 H_1^2 / 2 + E_2 H_2 (H_1 + H_2 / 2) + E_3 H_3 (H_1 + H_2 + H_3 / 2)}{E_1 H_1 + E_2 H_2 + E_3 H_3} \quad (10)$$

마찬가지로, 외팔보의 선형질량밀도 λ_m 는 각 층을 구성하고 있는 재료의 밀도를 포함한 등가 선형질량밀도 $(\lambda_m)_{eq}$ 로 대체되어야 한다.

$$(\lambda_m)_{eq} = b(\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2 + \rho_3 H_3) \quad (11)$$

이 때, ρ_i 는 각 층의 재료가 갖는 밀도를 뜻한다.

3. 실험

3.1 시험시편

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 마이크로 외팔보의 측면을 전자주사현미경으로 촬영한 사진이다. Nanoworld AG社에서 제작한 상용 프로브(Model SD-USC-F1.2-k7.3-TL)를 사용하였으며, 이는 석영 재질의 외팔보 상·하부 표면에 금 박막이 증착된 다층 구조를 가지고 있다. 치수와 물성에 관한 자세한 정보는 Table 1과 Table 2에 기재되어 있다.

Fig. 3 A field emission scanning electron microscopy picture of the laminated cantilever microbeam

Table 1 Dimensions of the cantilever microbeam

Dimension(μm)	Value
Length(L)	20
Width(b)	10
Thickness, quartz(H_2)	0.670
Thickness, gold(H_1 and H_3)	0.030

Table 2 Properties of the cantilever microbeam

Material properties	Quartz	Gold
Density(ρ) (kg/m^3)	2200	19,300
Young's modulus(E) (GPa)	73	79

3.2 실험장치

Fig. 4는 실험장치의 개략도를 보여준다. 서론에서 기술하였듯이, 본 연구에서는 PSD 기반이 아닌 레이저 간섭계 기반의 측정기법을 사용하여 고주파수 신호를 효과적으로 수신할 수 있도록 하였다(Kim *et al.*, 2017). 마이크로 외팔보를 공진시키기 위하여 Ritec Inc.社의 RPR-4000 초음파 펄서(pulser)를 사용하였으며, 이는 50kHz~20MHz 주파수 범위의 톤버스트(tone burst) 파형을 생성하여 탐촉자에 전달한다. 가진 주파수는 마이크로 외팔보의 고유진동수와 동일하게 설정하였다. 또한, 5 사이클의 사인파(sine wave)신호를 200Hz의 반복율로 입력하여 이전 신호로부터 가진된 마이크로 외팔보의 진동이 완전히 멈춘 후 다음 신호가 시작하도록 하였다. 마이크로 외팔보는 초음파 탐촉자의 표면에 설치되었다.

공진 신호를 수신하기 위하여 레이저 간섭계를 구축하였다. 100mW의 출력을 갖는 다이오드 펌프 연속파(continuous wave) 레이저를 사용하였으며, 그 파장은 532nm이다. 레이저

Fig. 4 A schematic of the experimental setup (BS: beam splitter; CM: cantilever microbeam; OBJ: microscope objective lens; PD: photodetector; PM: piezo mirror; UT: ultrasonic transducer)

광을 50:50 빔 스플리터(beam splitter)를 이용하여 시험 시편의 표면과 반사 거울에 각각 분배하여 조사하였으며, 50 배율의 현미경 렌즈를 이용하여 마이크로 외팔보의 표면에 집속 하였다. 반사된 광은 간섭무늬를 형성하여 광검출기에서 전기적 신호로 변환되어 오실로스코프에서 시간 영역 파형의 형태로 검출된다. 광검출기와 오실로스코프의 대역폭은 각각 50MHz와 350MHz이므로 마이크로 외팔보의 진동 신호를 수신하는데 제약은 주지 않는다. 반사 거울은 피에조 스택(piezo stack)에 장착되었으며, PID(proportional integral derivative) 제어를 사용하여 광경로차 보상 회로를 구성함으로써 실험 중 외란으로부터 발생하는 저주파 잡음신호를 제거하였다. 이처럼 수집한 파형을 3000번 평균하여 저장하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 5는 실험으로부터 측정된 마이크로 외팔보의 공진 신호에 대한 시간 영역 파형을 보여준다. 초음파 펄서로부터 가진 신호가 입력됨에 따라 변위가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 5사이클의 신호 입력이 끝나면 에너지가 소진되는 과정에서 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 파형을 고속 푸리에 변환(fast fourier transform)하여 주파수 응답 특성을 살펴본 결과이다. 이로부터 마이크로 외팔보가 1.350MHz의 고유진동수를 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 외팔보의 품질인자

Fig. 5 The time domain waveform of the resonating laminated cantilever microbeam

Fig. 6 The frequency response of the laminated cantilever microbeam

(Q)는 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = 143.6 \quad (12)$$

이 때, Δf 은 반폭치를 뜻한다. 식 (5)의 이론해를 1차 모드의 상수값인 $k_1 L = 1.875$ 에 대하여 Table 1과 Table 2에 기재된 값을 사용해 계산하면 $f = 1.339 \text{ MHz}$ 의 값이 얻어지는데, 이는 실험결과와 비교하였을 때에 0.8%의 상대오차에 해당하므로 본 실험법은 마이크로 외팔보의 동적 특성을 아주 높은 정확도로 측정할 수 있음을 입증한다. 물론, 보의 동적 거동에는 굽힘진동, 비틀림진동, 길이방향진동 등 다양한 현상이 존재하지만, 본 연구에서 입력한 가진조건은 굽힘진동모드의 1차 고유진동수와 일치하기 때문에 비틀림모드가 관찰되지는 않았다. 본 연구로부터 확립된 기법을 활용한다면 나노스케일 박막 혹은 바이오 물질과 같이 마이크로 외팔보의 표면에 흡착되는 재료의 특성을 높은 정확도로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 적층 외팔보의 고유진동수를 측정하였다. 상·하부 표면에 30nm 두께의 금 박막층이 증착된 석영 재질의 마이크로 외팔보에 대하여 공진 신호를 레이저 간섭계 기반의 광학 수신부를 사용하여 측정하였다. 다층 구조에 대한 등가 굽힘강성과 등가 선형질량밀도를 계산하여 오일러-베르누이 보 이론으로부터 고유진동수에 관한 이론해를 구하였으며, 이를 실험결과와 비교하여 0.8%의 상대오차를 확인하였다. 본 연구로부터 높은 정확도를 갖는 MEMS 센서의 개발과 이를 활용한 마이크로/나노재료의 특성평가가 기대된다.

Acknowledgment

This research was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Korean government(Ministry of Science & ICT)(No. 2015R1C1A1A01053635).

References

- Ali, S.M., Mantell, S.C., Longmire, E.K. (2011) Mechanical Performance of Microcantilevers in Liquids, *J. Microelectromechanical Syst.*, 20(2), pp.441~450.

- Bourouina, H., Yahiaoui, R., Yusifli, E., Benamar, M.E.A., Ghoumid, K., Herlem, G. (2016) Shear Effect on Dynamic Behavior of Microcantilever Beam with Manufacturing Process Defects, *Microsyst. Technol.*, pp.1~6.
- Comella, B.T., Scanlon, M.R. (2000) The Determination of the Elastic Modulus of Microcantilever Beams Using Atomic Force Microscopy, *J. Mater. Sci.*, 35(3), pp.567~572.
- Cortés, F., Sarría, I. (2015) Dynamic Analysis of Three-layer Sandwich Beams with Thick Viscoelastic Damping Core for Finite Element Applications, *Shock & Vib.*, 2015, p.736256.
- Enning, R., Ziegler, D., Nievergelt, A., Friedlos, R., Venkataramani, K., Stemmer, A. (2011) A High Frequency Sensor for Optical Beam Deflection Atomic Force Microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, 82(4), p.043705.
- Kim, Y.Y., Lee, S., Park, J., Cho, Y. (2017) Ultrasonic Characterization of a Resonating High-Speed Microcantilever, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 41(6), pp.483~489.
- Kim, H.C., Lee, S.H. (2012) Sensing System for Measuring Deflection of Microcantilever, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 36(9), pp.961~964(in Korean).
- Landau, L.D., Lifshitz, E.M. (1970) *Theory of Elasticity*, Pergamon Press, Oxford.
- Li, M., Tang, H.X., Roukes, M.L. (2007) Ultra-sensitive NEMS-based Cantilevers for Sensing, Scanned Probe and Very High-frequency Applications, *Nature Nanotechnology*, 2(2), pp.114~120.
- Na, S., Park, J., Chang, K. (2013) Detection of Silver Ion Using Microcantilever's Resonant Frequency, *Proc. KSNVE Annual Spring Conference*, Yeosu, Korea, pp.807~808(in Korean).
- Tang, Y., Fang, J., Yan, X., Ji, H.-F. (2004) Fabrication and Characterization of SiO₂ Microcantilever for Microsensor Application, *Sensors & Actuators B*, 97(1), pp.109~113.

요 지

오늘날까지 적층 마이크로 외팔보의 고유진동수에 대하여 연구가 진행되었다. 마이크로 보는 실리콘 재료로 만들어 지지만, 그것의 상하 표면은 얇은 금 박막층(~30nm)이 증착되어 있다. 초음파 검사를 위해 초음파 테스트 플랫폼을 사용했으며, 시간영역 신호는 광학적으로 측정되었다. 고유진동수는 파형을 고속 Fourier 변환을 통해 정량화하였으며, 결과적으로 고전적인 보 이론과 일치하는 결과를 보여 주었다. 본 연구는 마이크로/나노스케일 재료와 마이크로 구조에 대한 동적평가기법을 제공할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 적층 마이크로 외팔보, 고유진동수, 레이저 간섭계, 보 이론