

초음파원자현미경 캔틸레버의 접촉공진주파수 시뮬레이션 Simulation of Contact Resonance Frequency of Ultrasonic AFM Cantilever

*한유하¹, #박익근², 곽동열¹, 김용권²

*Y. H. Han¹, #I. K. Park(ikpark@seoultech.ac.kr)², D. R. Kwak¹, Y. K. Kim²

¹서울과학기술대학교 NID 대학원, ²서울과학기술대학교 기계공학과

Key words :Ultrasonic-AFM, Cantilever, FEM simulation, Contact resonance frequency

1. 서론

반도체공정의 급속한 발전으로 나노 공정으로 생산되는 제품에 대한 신뢰성 평가기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 초음파원자현미경(UAFM; Ultrasonic AFM)은 원자현미경(AFM; Atomic Force Microscopy)에 초음파특성을 접목한 것으로 소재의 표면이미지 뿐만 아니라 표면의 탄성특성을 측정할 수 있는 획기적인 분석 기술이다[1]. 이들은 기본적인 원자 현미경에 고주파수로 캔틸레버를 여기 시켜 높은 탄성력으로 팁과 시료의 상호 작용력을 통해 시료의 표면과 표면직하까지의 재료특성을 검출하는데 정밀도 높게 측정하고 이를 이미지화 하는 분석기술이다[2].

본 논문에서는 초음파원자현미경 캔틸레버의 접촉공진주파수의 모드에 따른 거동 및 재료에 따른 접촉공진주파수의 변화를 분석 하였다. 이로써 초음파원자현미경을 활용한 비파괴적인 물성특성에 관한 데이터의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 캔틸레버의 진동 특성 이론

캔틸레버는 팁-시험편 사이에 작용하는 상호 작용력에 따라 민감한 공진 반응을 나타낸다. 이때, 팁의 거동은 Fig. 1과 같이 스프링 접촉 모델로 표현할 수 있다. 균일한 단면적을 갖는 빔의 경우, 초기변형에 의한 응답변위는 $y(x,t)$ 로 주어지고 횡방향의 진동방정식은 식 (1)과 같다[3,4].

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 E 는 캔틸레버의 탄성계수, ρ 는 밀도, A 는 단면적, I 는 캔틸레버 관성모멘트, $y(x)$ 는 길이 x 에서 평균 위치로부터의 변위, k^* 는 접촉강성, k 는 캔틸레버의 강성계수이다.

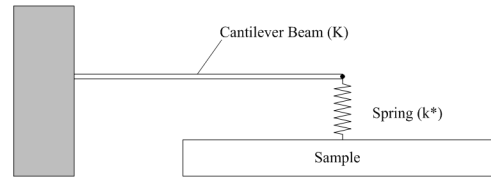


Fig. 1 Schematic diagram of a rectangular cantilever in contact with a sample simulating clamped spring coupled cantilever

이때 스프링 결합 시스템의 경계조건은 식 (2)와 같고 경계조건을 적용한 캔틸레버의 진동방정식은 식(3)과 같다.

$$y = 0, \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (x = 0)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \frac{3k^*}{kl^3} y \quad (x = l) \quad (2)$$

$$\sin h k_n l \cos k_n l - \sin k_n l \cosh k_n l$$

$$= \frac{(k_n l)^3 k}{3k^*} (1 + \cos k_n l \cosh k_n l) \quad (3)$$

식(3)에서 k_n 은 캔틸레버 특성방정식의 n 차모드에 대한 해를 나타내고 있다. 접촉공진주파수를 구하기 위하여 k^*/k 를 계산하고 특성방정식에 대입하면 시험편과 캔틸레버가 접촉하였을 때의 접촉공진주파수를 구할 수 있다.

3. 캔틸레버의 시뮬레이션

3.1 3D modeling

초음파원자현미경 캔틸레버의 형상 및 크기는 Nano sensorTM의 PPP-CONTR 팁의 설계치수를 참조하여 $2.8 \times 23 \times 224 \mu\text{m}$ 크기로 Fig. 2와 같이 설계하였다.

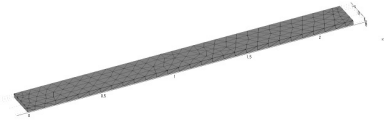


Fig. 2 Mesh geometry of cantilever beam

기본 구속조건은 한쪽 면 고정을 한 자유공진이며 매쉬는 정사각형 매쉬로 901개의 요소와 376개의 포인트로 이루어져 있다. 매쉬의 형상 이미지는 Fig. 2 와 같다.

3.2 접촉공진주파수

캔틸레버의 접촉공진주파수를 시뮬레이션 하기 위하여 접촉된 시험편은 $2 \times 2 \times 5 \mu\text{m}$ 크기로 설계 하였다. 재료에 따른 접촉공진주파수의 차이를 확인하기 위하여 구리와 알루미늄의 탄성계수 (Elastic modulus) 차이가 큰 두 재료를 이용하였으며, 재료의 특성은 Table 1 에 나타내었다. 접촉공진주파수 해석을 위한 구속조건은 Fig. 3 과 같이 보의 끝단부와 접촉공진을 구하려는 시험편의 밑단을 고정하였다[5].

Table 1의 물성값을 적용하여 접촉공진주파수를 시뮬레이션 한 결과, 각 시험편의 모드에 따른 접촉공진주파수 값은 Table 2와 같고 이때의 모드에 따른 변형 형상 이미지를 Fig. 4에 나타내었다.

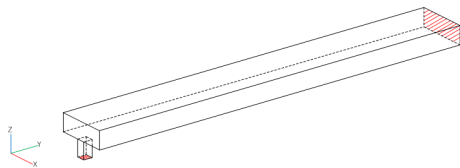


Fig. 3 Geometry of cantilever beam with contact sample

Table 1 Material properties

Quantity	E [Pa]	ν	ρ [kg/m ³]
Cu	110×10^9	0.35	8700
Al	70×10^9	0.33	2700

Table 2 Simulation result of contact resonance frequency

Sample \ Mode	1 st [kHz]	2 nd [kHz]
Cu	368.88	1077.83
Al	358.77	1063.34

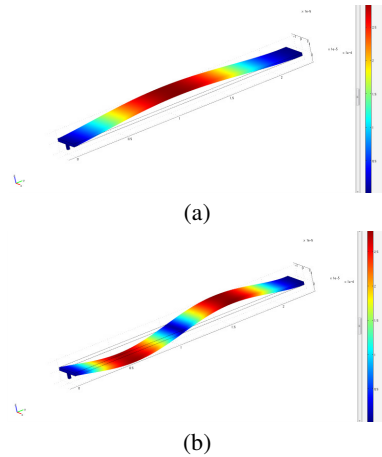


Fig. 4 Simulation of deformation image of contact resonance frequency; (a) Mode 1 (b) Mode 2

4. 결론

구리와 알루미늄의 접촉공진 시뮬레이션의 결과를 비교하였을 때 탄성계수가 클수록 접촉공진주파수도 높아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 초음파원자현미경의 접촉공진주파수의 값을 비교함에 따라 초음파원자현미경의 신뢰성을 향상시키고 재료의 특성을 비교할 수 있는 기준을 제시하고자 한다.

참고문헌

- [1]. T. S. Park, D. R. Kwak, I. K. Park, C. S. Kim, "Evaluation of Elastic Properties and Analysis of Contact Resonance Frequency of Cantilever for Ultrasonic AFM", J. of KSNT, 31, 174-180, 2010
- [2]. K. Yamanaka, H. Ogiso and O. Kolosov, "Ultrasonic force microscopy for nanometer resolution subsurface imaging", Appl. Phys. Lett. 64, 178-181, 1994
- [3]. F. Ohnesorge and G. Bining, "True atomic resolution by atomic force microscopy through repulsive and attractive forces", Science, 260, 1451-1456, 1993
- [4]. A. A. Tseng, A. Notargiacomo and T. P. Chen, "Nanofabrication by scanning probe microscope lithography: A review", J. Vac. Sci. Technol. B., 23, 877-894, 2005
- [5]. K. Yamanaka and S. Nakano, "Ultrasonic Atomic Force Microscope with Over Excitation of Cantilever", Jpn. J. Appl. Phys., 35, 3787-3792, 1996