

마이크로 마모 시험기 개발을 위한 설계 방안 및 구조 해석

Design Approach and Structural Analysis for Development of a Micro-Wear Tester

유신성*, 김대은[†]

Shin Sung Yoo and Dae Eun Kim

(2012년 3월 12일 접수; 2012년 3월 16일 심사완료; 2012년 3월 23일 게재 확정)

Abstract

The tribological behavior of microsystems needs to be clearly understood in order to improve the reliability of precision components. For example, friction and wear phenomena pose serious problems in MEMS applications. As a first step to investigate the tribological behavior of such systems, an appropriate testing system must be acquired. In this work, a micro-wear tester based MEMS platform was designed. The main concern was to achieve a desirable range of horizontal displacement for the specimen holder and also to apply a normal force in the tens of μN range. The structural analysis of the micro-wear tester showed that the proposed design satisfied these requirements while maintaining the structural integrity.

Key Words : MEMS, micro wear tester, structural analysis, tribology

1. 서론

현재 다양한 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 가 상용화에 성공하여 여러 분야에서 기존의 장치를 대체하여 활용되고 있다. 하지만 상대 운동을 하는 구동부위를 가진 MEMS 장치는 아직 상용화되지 못하고 있는 실정이며 현재 상용화된 대부분의 MEMS 장치는 잉크젯 프린터 헤드와 같이 움직이는 부분이 없거나, 움직이는 부분이 있더라도 가속 센서와 같이 다른 면과 접촉하는 부분이 없이 움직인다. Optical MEMS 와 같이 접촉을 포함한 운동을 하는 경우에도 면을 지지하기 위해 점 접촉을 할 뿐 상대 운동을 하는 접촉면은 가지고 있지 않다[1-3]. 이는 아직까지 micro 영역에서의 마찰과 마모 문제가 해결되지 못해서 상대운동을 하는 구동 부위를 가진 MEMS

장치를 양산할 만큼의 성능과 내구성을 확보할 수 없었기 때문이다.

Macro system 의 많은 장치들은 상대 운동을 하는 구동부위를 가지고 있다. 이러한 macro system 장치를 소형화하여 저전력, 저가격의 장점을 가지는 micro system 장치로 양산하기 위해선 MEMS 장치의 마찰과 마모 문제 해결이 선행하여 해결되어야 한다. Micro 영역에서 마찰과 마모 현상을 이해하기 위하여 AFM(Atomic Force Microscopy)을 이용한 많은 연구가 진행되었다[4-7]. 하지만 하중에 비해 상대적으로 tip 의 크기가 매우 작기 때문에 높은 접촉 압력이 발생하게 되며 scan area 의 크기에 따라 마찰계수가 달라지는 현상[8]이 발생하는 등 실제 micro system 장치의 조건과 상이하다는 문제점을 가지고 있다.

또한 보다 실제와 비슷한 조건에서 실험을 하기 위해서 다양한 MEMS tribometer 가 개발되었다[9-11]. 하지만 기존의 MEMS tribometer 는 실리콘 웨이퍼에 가공된 수직면인 side wall 간에 접촉을 발생시키기 때문에 실리콘

[†] 연세대학교 기계공학과
E-mail : kimde@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2822 Fax : (02)365-0491
* 연세대학교 기계공학과

웨이퍼의 가공된 면의 가공 상태에 따른 오차가 발생할 수 있다. 이로 인해 반복 실험 시 발생한 현상의 mechanism 을 일관성 있게 분석하기가 어렵고 수직면에는 윤활제나 코팅 또는 surface texturing 과 같은 표면 특성 개선을 위한 처리가 어려워져 윤활제 사용과 표면 특성 개선에 제한을 받을 수밖에 없었다. 또한 실험 후 접촉면을 MEMS 장치에서 분리할 수 없기 때문에 실험 후 표면에 대한 분석이 쉽지 않았다. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 새로운 micro wear tester 를 제안하였다.

2. 설계 방안 및 구조 해석

나노/마이크로 스케일의 극저마모 기술을 위한 표면 설계 변수를 확립하기 위하여 기존의 MEMS tribotester 보다 개선된 bottom part 와 upper part, 두 파트로 이루어진 micro wear tester 개발을 진행하였다. Fig. 1 은 새로운 micro wear tester 의 개략도이다. 새로운 micro wear tester 는 가공에 의한 오차가 반영되지 않은 smooth surface 를 접촉시키기 때문에 반복 실험 시 발생한 마찰 마모 현상의 mechanism 을 일관성 있게 분석할 수 있고 bottom part 와 upper part, 두 파트를 접촉시키기 전에 표면 특성 개선을 위한 윤활제, 코팅, 표면 patterning 을 쉽게 할 수 있다. 또한 실험 후 분리하여서 표면의 상태를 다양한 표면 분석 장치를 사용하여 분석할 수 있다. Micro wear tester 는 수직 하중이 수십 μN 일 때 수직 방향 변위가 $1\ \mu\text{m}$ 정도가 되도록 설계 목표를 설정하였다. 이를 위하여 다양한 형태의 구조를 검토하였으며 최종적으로 rib 구조가 있는 형태의 tester 를 설계하였다. Table 1 은 최종 결정된 micro wear tester 의 설계 변수 값을 보여준다. 각 부위의 세부 설계값은 ANSYS 구조해석을 통하여 최적화하였다. 재질은 실리콘 웨이퍼의 물성

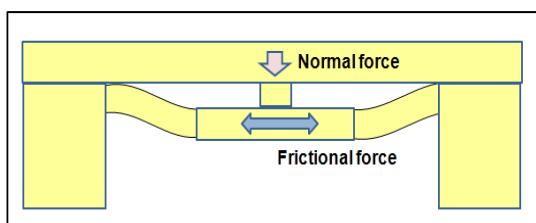


Fig. 1 Schematic of a micro wear tester

Table 1 Design parameters of micro wear tester

Design parameters	Value
Thickness of comb electrodes	20 μm
Gap between the electrode fingers	4 μm
Cantilever width	8 μm
Cantilever length	1.25 mm, 1.47 mm

치를 사용하였다. 8 개 cantilever 의 끝 부분을 고정하고 수직 방향 하중은 셔들 중앙 부분에 인가하고 수평 방향 하중은 wing 구조의 8 개 옆면에 인가하였다.

Fig. 2 는 수직 하중이 $50\ \mu\text{N}$ 일 때 수직방향으로 약 $1.5\ \mu\text{m}$ 변형되는 micro wear tester 의 해석 결과이다. 구조해석에서 rib 구조는 동일한 무게의 wing 구조로 간략화하였다. 구조 해석의 결과는 cantilever 의 폭과 cantilever 로 지지되는 부분의 무게에 의해 주로 결정되기 때문에 comb driver 구조의 간략화는 구조해석에 큰 영향을 미치지 않는다. 수직 방향 변형에 대한 수직 하중의 관계를 구조 해석을 통해 평가해보면 다음 Fig. 3 과 같이 $1.5\ \mu\text{m}$ 수직 방향 변형까지 수직 방향 하중과 선형적 특성을 보임을 확인할 수 있다. Micro wear test 의 수직 방향 변형에 대한 수직 하중의 stiffness 는 $32.49\ \text{N/m}$ 이다. Comb driver 의 정전기력에 의해 구동되는 수평 방향 운동은 Fig. 4 과 같이 comb driver 에 충분한 전압이 인가된 경우 수백 μN 의 힘을 발생시켜 최종적으로 수평 방향으로 수십 μm 내외로 이동하도록 설계되었다. 수평 방향 변형에 대한 수평 방향 힘의 관계를

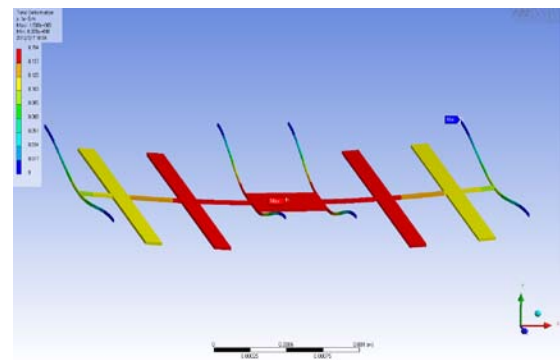


Fig. 2 Structural analysis of vertical deformation

$$F_x = \frac{N \epsilon t}{g} V^2 \quad \text{---- (1)}$$

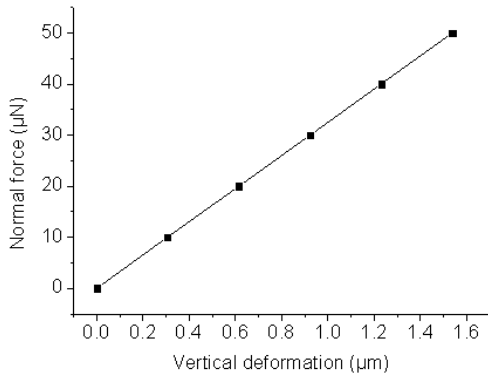


Fig. 3 Vertical deformation vs normal force

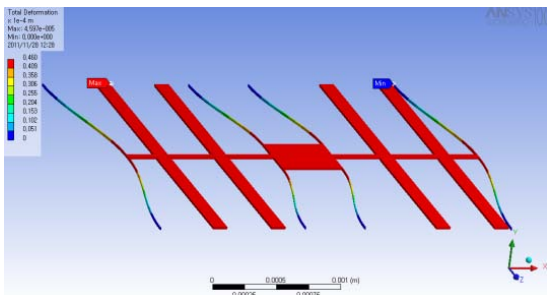


Fig. 4 Structural analysis of horizontal deformation

구조 해석을 통해 평가해보면 다음 Fig. 5 과 같이 50 μm 까지 수평 방향 변형에 대해 수직 하중과 선형적 특성을 보임을 확인할 수 있다. 수평 방향 변형에 대한 수평 방향 힘의 stiffness 는 6.32 N/m 로 수직 방향에 비해 5 배정도 낮음을 확인할 수 있다. Fig. 6 은 아래 수식 1 과 같은 comb-drive actuator 의 변환식 [13] 을 이용해서 micro wear test 의 input voltage 와 horizontal force 의 관계를 계산한 결과이다.

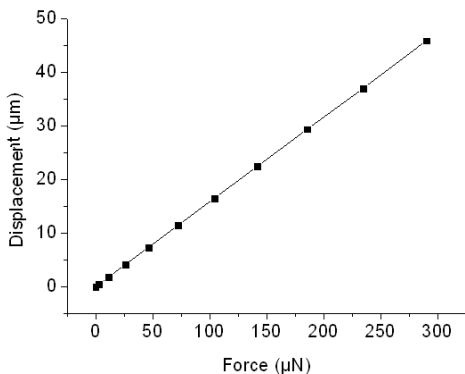


Fig. 5 Horizontal force vs displacement

여기서 N 은 comb drive electrode fingers 의 갯수, ε 은 공기의 dielectric constant, t 는 comb electrode 의 두께, g 은 electrode fingers 사이의 간격, V 는 입력 전압을 나타낸다. 최종적으로 micro wear test 의 input voltage 와 horizontal displacement 는 Fig. 7 과 같은 관계를 나타낸다.

근사식은 $y = 0.000459x^2$ 로 입력 전압과 수평 방향 변위는 선형적으로 비례하지 않음을 확인할 수 있다. 원하는 수평 운동을 발생시키기 위해서는 임의 파형 발생기를 이용하여 입력 전압 파형을 적합하게 보정해야 함을 확인할 수 있다. Fig. 8 은 수직방향으로 1.5 μm, 수평방향으로 45.93 μm 변위가 동시에 발생할 때 micro wear tester 에 걸리는 응력 해석 결과이다.

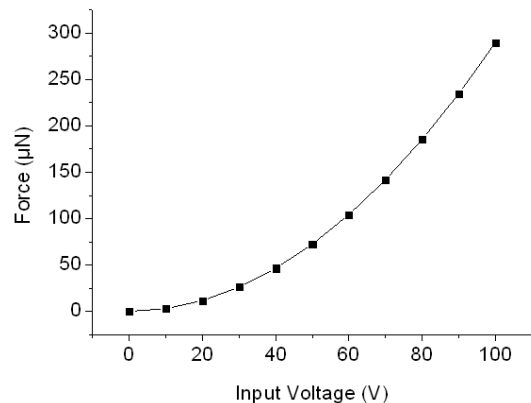


Fig. 6 Input voltage vs horizontal force

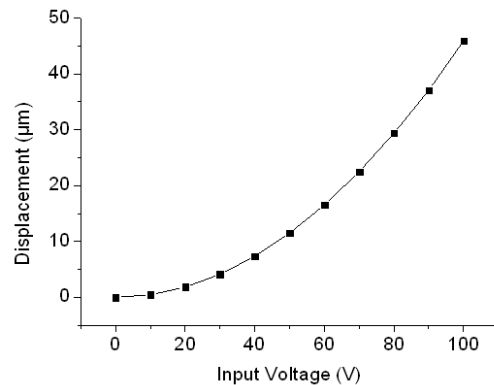


Fig. 7 Input voltage vs horizontal displacement

최대 주응력 및 최대 전단응력은 각각 0.16 GPa 과 0.077 GPa 로 설계 조건에서 발생하는 응력 범위가 안정적인 탄성영역에 있음을 확인할 수 있다. Fig.9 부터 Fig.11 은 공진 주파수 해석 결과이다. 1 차 모드는 수평 방향으로 1397 Hz 에서 발생하고 2 차 모드는 수직 방향으로 3319 Hz 에서 발생하며 3 차 모드는 수평 방향 벡터에 대한 회전 모드로 2 차 모드와 비슷한 3396 Hz 에서 발생한다. MEMS 구조 설계에서 공진 주파수는 시스템의 충격에 대한 안정성을 판단하는 중요한 요소이다[12]. 설계된 micro wear tester 의 공진 주파수 1 차 모드 값이 reference 로 삼은 large displacement comb-drive actuators [13]의 공진 주파수 1 차 모드 1600 Hz 와 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 일반적인 도로 조건에서 자동차에서 발생하는 공진 주파수 범위인 0 Hz 에서 400 Hz 영역 [14]에서 3 배 이상 떨어져있어 운송 과정에서 공진에 의한 파손이 발생하지 않을 것을 확인할 수 있다.

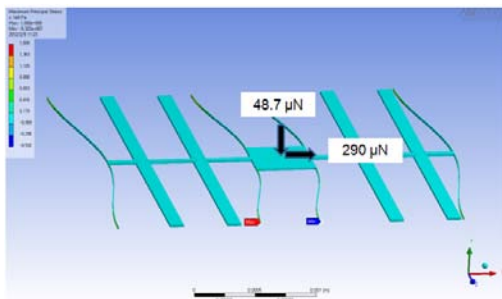


Fig. 8 Structure analysis of maximum principal stress

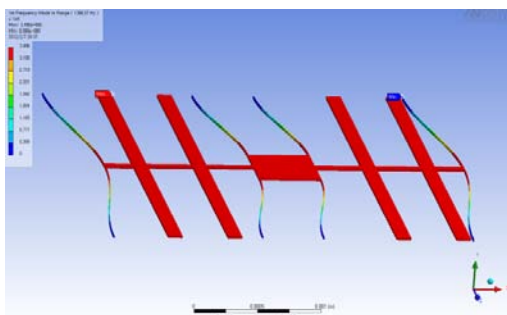


Fig. 9 Resonance frequency analysis 1st mode: 1397 Hz

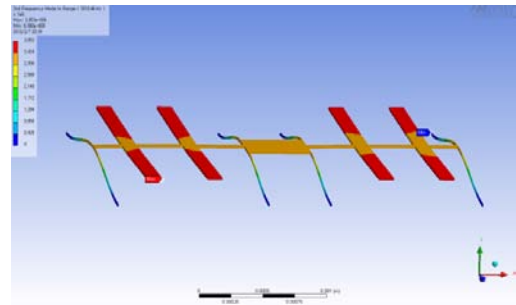


Fig. 10 Resonance frequency analysis 2nd mode: 3319 Hz

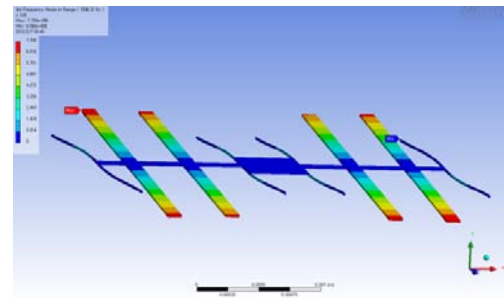


Fig. 11 Resonance frequency analysis 3rd mode: 3396 Hz

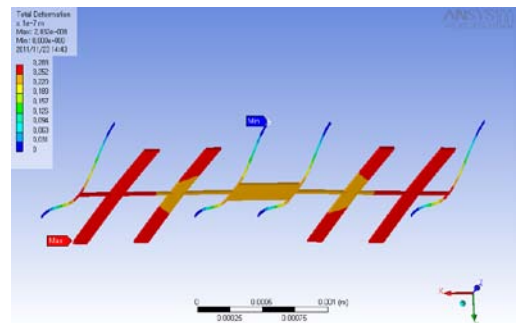


Fig. 12 Vertical deformation by gravity

Fig. 12 는 micro wear tester 에 대한 중력에 의한 영향을 해석한 결과로 수직 방향으로 2.8 nm 의 처짐이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 수직 방향변위 1μm 의 0.28-%에 해당하는 값으로 MEMS fabrication 가공 공차 정도의 수준임을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 미세부품의 마모특성을 파악하기 용이한 micro wear tester 를 설계하였다. 원하는 작동 조건을 만족시키기 위하여 구조해석을 실시하여 다음 결과를 확인할 수 있었다.

(1) 구조 해석을 통하여 설계된 micro wear tester 가 수직, 수평 방향 변형이 수직, 수평 방향 힘과 선형적인 특성을 가짐을 확인하였다.

(2) 공진 주파수 해석을 통하여 설계된 micro wear tester 가 안정적으로 실험을 진행할 수 있는 구조임을 확인하였다.

(3) Micro wear tester 에 대한 중력에 의한 영향은 무시할 수 있음 확인하였다.

이러한 micro wear tester 를 이용하여 앞으로 micro 영역에서 MEMS material 개발, MEMS 윤활제 개발, MEMS 기능성 코팅 개발, MEMS 표면 patterning 개발을 위한 마찰, 마모 특성에 대해 보다 체계적 분석이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2012-0001232)

참고 문헌

[1] S. Kamisuki, M. Fujii, T. Takekoshi, C. Tezuka, M. Atobe and M. A. Green, 2000, "A high resolution, electrostatically-driven commercial inkjet head", Micro Electro Mechanical System, The Thirteenth Annual International Conference on, pp. 793-798.

[2] X. Xiong, Y. Wu and W. B. Jone, 2008, "Material fatigue and reliability of MEMS accelerometers ", Defect and Fault Tolerance of VLSI Systems, IEEE International Symposium on, pp. 314 – 322.

[3] P.F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R.E. Meier and M.R. Douglass, 1998, "A MEMS-based projection display", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 86, No.8, pp.1687-1704.

[4] G. Binnig and C. F. Quate, 1986, "Atomic Force Microscope", Physical Review Letters, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933.

[5] O. Marti, B. Drake, S. Gould and P. K. Hansma, 1986, "Atomic resolution atomic force microscopy of graphite and the "native oxide" on silicon", Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films, Vol. 6, No. 2, pp. 287-290.

[6] K. H. Chung and D. E. Kim, 2005, "Characteristics of fracture during the approach process and wear

mechanism of a silicon AFM tip", Ultramicroscopy, Vol. 102, pp. 161-171.

[7] H. J. Kim and D. E. Kim, 2009, "Manufacturing-nano-scale friction: a review", International Journal of Precision Engineering, Vol.10, pp.141-151.

[8] N. S. Tambe and B. Bhushan, 2004, "Scale dependence of micro/nano-friction and adhesion of MEMS/NEMS materials, coatings and lubricants", Nanotechnology, Vol.15, pp.1561-1570.

[9] A.V. Desai and M. A. Haque, 2004, "A novel MEMS nano-tribometer for dynamic testing in-situ in SEM and TEM", Tribology Letters, Vol.18, No.1, pp.13-19.

[10] W. M. van Spengen and J. W. M. Frenken, 2007, "The Leiden MEMS tribometer : real time dynamic friction loop measurements with an on-chip tribometer", Tribology Letters, Vol.28, pp.149-156.

[11] H. Yu, G. Zhou, X. Chew, S. K. Sinha and F. S. Chau, 2011, "Nano-tribometer integrated with a nano-phonic displacement sensing mechanism", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 21, pp. 1-9.

[12] S. W. Yoon, 2009, "Vibration isolation and shock protection for MEMS", ProQuest.

[13] R. Legthenberg, A. W. Groeneveld and M. Elwenspoek, 1996, "Comb-drive actuators for large displacement", J. Micromech. Micoeng. Vol. 6, pp. 320-329.

[14] J. Y. Wong, 1993, "Theory of ground vehicles, 2 edition.", John Wiley & Sons.