

정밀 마찰측정을 위한 이중 캔틸레버 구조 마찰시험기의 설계에 관한 연구

강원빈 · 김현준*

경북대학교 정밀기계공학과

A Study on the Design of a Double Cantilever Structure Friction Tester for Precision Friction Measurement

Won-Bin Kang and Hyun-Joon Kim*

Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University

(Received June 25, 2018; Revised July 20, 2018; Accepted July 20, 2018)

Abstract – A precision tribometer consisting of a cantilever was designed to measure frictional forces in the micro-Newton range. As frictional forces are measured based on the bending of the cantilever, vibration of the cantilever is the most significant factor affecting the quality of the friction measurement. Therefore, improved design of the tribometer with double cantilevers and a connecting plate that united the two cantilevers mechanically was suggested. For the verification of the modified design of the tribometer, numerical analysis and experiments were conducted. Examination using the finite element method revealed that the tribometer with a double cantilever and a connecting plate exhibited faster damping characteristics than the tribometer with a single cantilever. In the experiment, effectiveness of the double cantilever and connecting plate for vibration reduction was also confirmed. Vibration of the tribometer with double cantilever decreased eight times faster than that of the tribometer with a single cantilever. The faster damping of the double cantilever design is attributed to the mechanical interaction at the contacting surfaces between the cantilever and the connecting plate. Tribotesting using the tribometer with a single cantilever resulted in random fluctuation of frictional forces due to the stick-slip behavior. However, using the tribometer with a double cantilever and connecting plate for the tribotest gave relatively uniform and steady measurement of frictional forces. Increased stiffness owing to using a double cantilever and mechanical damping of the connecting plate were responsible for the stable friction signal.

Keywords – precision tribometer(정밀 마찰시험기), cantilever(외팔보), vibration analysis(진동 분석), finite element analysis(유한요소해석), Stick-slip(스틱슬립)

1. 서 론

오늘날 정밀기계산업이 발달함에 따라 기계요소가 점차 소형화되고 있으며, 기존에 비해 더 향상된 수준의 공차와 내구성 및 신뢰성이 요구되고 있다[1]. 기계요소가 소형화 및 정밀화 됨에 따라 작동하중이 전반적

으로 저감되고 보다 정밀한 수준의 공차가 요구되며, 그에 따라 표면의 조도(surface roughness) 역시 일정 수준 이내로 관리될 필요가 있다[2,3]. 뿐만 아니라 정밀기계요소에서는 마모의 발생 또한 최소화할 필요성이 제기되는데, 이는 더 작아진 공차로 인하여 소량의 마모입자가 접촉면 사이에서 발생할 경우 마찰력을 크게 증가시키거나 시스템의 심각한 문제를 야기할 수 있기 때문이다[4].

따라서 기계요소가 정밀화 됨에 따라 보다 높은 신뢰성을 확보하기 위해서는 트라이볼로지적 특성에 대한

*Corresponding author: hjoonkim@knu.ac.kr
Tel: +82-54-530-1273, Fax: +82-54-530-1278
<http://orcid.org/0000-0002-6817-1004>
© 2018, Korean Tribology Society

심도 깊은 이해가 요구된다. 특히 트라이볼로지적 시험은 대체로 기계요소가 작동하는 환경과 유사한 조건에서 시험을 수행하는 것이 일반적이다[5]. 그러나 마찰 및 마모특성 규명을 위하여 기존에 활용되어온 실험기기들은 대체로 매크로 스케일에서 작동하며 수백 mN에서 수백 N수준의 수직하중을 인가하여 실험을 수행하는 경우가 대다수이다[6-8]. 정밀한 시험을 위하여 원자현미경(atomic force microscopy)을 활용하기도 하지만, 이 경우에는 수직하중이 수 nN에서 수 μ N 수준으로 매크로스케일의 시험을 위한 장비와 비교하여 지나치게 작은 하중조건이라고 할 수 있다. 뿐만 아니라 원자현미경을 이용한 트라이볼로지적 시험을 수행하기 위해서는 비교적 복잡한 과정을 거쳐야 하는 교정(calibration) 작업이 필수적으로 요구되어 숙련된 사용자가 아닌 경우에는 정량적 평가에 활용하기 어렵다[9,10]. 그 외에도 매크로 스케일과 나노 스케일의 중간 단계를 측정할 수 있는 마찰시험기도 존재하나 그 기본적인 원리와 형태는 원자현미경과 크게 다르지 않다[11]. 비교적 단순한 형태의 설계를 토대로 마이크로 뉴턴(μ N) 스케일의 마찰력을 측정할 수 있는 방법은 캔틸레버 형태를 갖는 구조물이나 이 경우 진동이 측정에 문제를 야기할 수 있으므로 이에 대한 개선이 요구된다[12].

그러므로, 정밀 기계요소의 트라이볼로지적 특성을 평가하기 위해서는 낮은 수직하중 조건에서 시험을 수행할 수 있는 기기의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 마이크로 뉴턴 스케일의 마찰력을 측정할 수 있는 정밀 마찰시험기기의 설계를 제안하고 진동특성 파악 및 성능개선을 위한 방안을 도출하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 정밀마찰시험기의 설계

본 연구에서는 마이크로 뉴턴수준의 마찰력을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 긴 캔틸레버 형태를 갖는 구조물의 설계를 제안하였다. Fig. 1(a)에 잘 나타나는 것처럼 캔틸레버의 끝단에는 시편을 가두는 역할의 사각형 구속판이 부착되며 캔틸레버의 반대쪽 끝단은 3축 스테이지에 고정된다. 그리고 고정부위 근방에는 한 면에 각각 2개씩, 총 4개의 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 캔틸레버의 휨에 따라 신호를 획득할 수 있도록 하였다. 캔틸레버의 아래에는 모터가 위치하며 모터위에는 측정하고자 하는 재료로 구성된 시

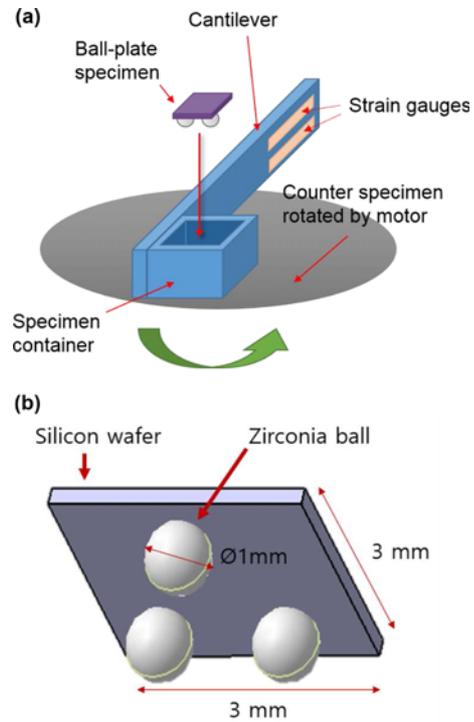


Fig. 1. Schematic of (a) precision tribometer and (b) ball-plate specimen.

편을 올려놓게 된다. 이 때, 시편과 캔틸레버는 접촉하지 않으며 1 mm 이하의 간격을 갖도록 한다. 시편과 접촉하여 상대운동 할 상대면의 형태로는 볼-평판 시편이라고 부르는 구조물을 제안하였다. 볼-평판 시편은 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 가로, 세로 각각 3 mm 길이의 실리콘 웨이퍼 조각에 지름 1 mm인 지르코니아(zirconia) 볼을 3개 부착한 형태로 선정하였다. 볼-평판 시편은 캔틸레버 끝단의 구속판 내부에 3개의 지르코니아 볼이 아래를 향하게 삽입하여, 모터위의 시편과 접촉하도록 함으로써 볼-평판 시편의 무게가 곧 수직하중으로 작용하도록 하였다. 모터를 회전시키면 3개의 지르코니아 볼이 시편과 접촉한 상태로 상대운동하게 되며 지르코니아 볼이 부착된 사각형의 실리콘 웨이퍼 조각은 캔틸레버 끝단의 구속판 벽면과 접촉하여 지르코니아 볼에 가해지는 마찰력을 캔틸레버로 전달하는 역할을 수행한다.

캔틸레버의 소재는 0.1 mm의 두께를 갖는 스테인리스 스틸(SUS304)로 선정하여 작은 마찰력에도 쉽게 휨이 발생하도록 하였다. 그러나 단순한 캔틸레버 형태는 진동을 감쇠할 수 있는 요소가 없어 마찰력이 지

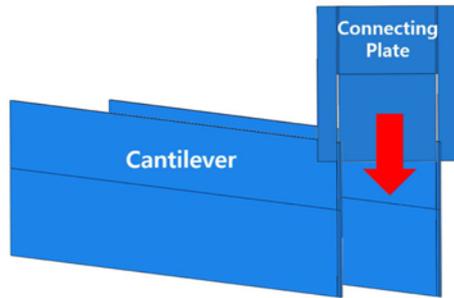


Fig. 2. Schematic of tribometer consisted of two parallel cantilevers and connecting plate.

속적으로 변화하는 상황에서 발생하는 자연진동으로 인해 측정신호의 왜곡을 일으킬 수 있다. 이러한 현상은 측정의 신뢰도를 낮추는 원인이므로 반드시 개선해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 단일 캔틸레버 설계외에도 진동에 의한 문제를 최소화하기 위한 추가적인 설계 또한 제안하고자 하였다. Fig. 2는 평행하게 배치된 두 개의 캔틸레버와 이들을 연결하는 연결판으로 구성된 개선된 마찰시험기의 개략도이다. 끼움판과 캔틸레버 사이에는 작은 기계적 간섭이 발생하는데, 이 기계적 간섭이 진동을 빠르게 감쇠시켜줄 것을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 서로 다른 설계의 마찰시험기를 수치해석 및 실험적으로 평가하여 특성을 규명하고자 하였다.

2-2. 유한요소기법을 이용한 정밀마찰시험기 거동의 해석

실제 마찰시험기를 제작하여 평가하기에 앞서 설계의 타당성을 검토하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 소프트웨어로는 ABAQUS(Dassault Systemes, France)를 이용하였으며, 세가지 서로 다른 모델에 대하여 진동감쇠 특성을 살펴보았다. 단일 캔틸레버로 이루어진 모델, Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 두 개의 캔틸레버를 연결판을 이용하여 기계적으로 체결한 모델, 그리고 추가적으로 Fig. 3(b)의 그림과 같이 두 개의 캔틸레버와 연결판을 접합(tie 조건)시켜 체결한 모델, 이렇게 세가지 다른 특성을 지닌 모델에 대하여 일정한 변형을 가하였다가 구속조건을 제거하였을 때 발생하는 진동이 얼마나 빠른 시간 안에 감소하는지 알아보고자 하였다. 본 연구에서 제안한 마찰 시험기는 캔틸레버의 휨을 스트레인 게이지를 통하여 하중으

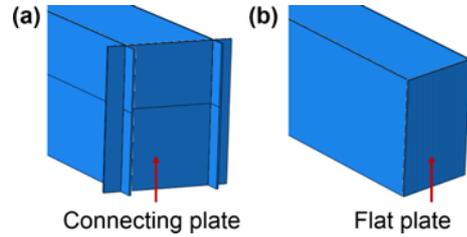


Fig. 3. Schematic of models with (a) double cantilever interlocked with connecting plate and (b) double cantilever bonded with flat plate.

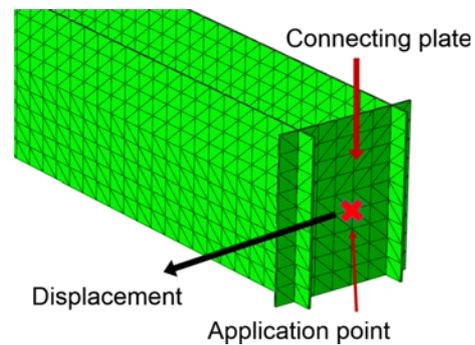


Fig. 4. Image of simulation model consisted of double cantilever and connecting plate.

로 변환하는 것이 주된 원리이므로 마찰력이 발생하는 동적 작동상황에서 캔틸레버의 진동이 적절하게 제어되지 않는다면 측정되는 마찰력에 왜곡이 발생할 수 있으므로 캔틸레버의 진동 정도를 변위로 나타내어 진동감쇠 특성을 나타내었다.

Fig. 4는 모델에 1 mm 크기의 삼각형 메쉬(mesh)를 생성시킨 결과를 나타내고 있으며, 연결판의 중앙은 변위를 인가하기 위한 작용점으로 설정하였다. 연결판과 캔틸레버가 접촉하는 부위는 메쉬를 보다 잘게 나누어 생성하여 해석결과의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 진동특성을 규명하기 위하여 시뮬레이션은 dynamic implicit 모드에서 진행하였고, 재료는 실제의 캔틸레버 및 연결판과 같이 스테인리스 스틸로 설정하였다. 소성변형은 고려하지 않으므로 재료물성으로는 밀도, 탄성계수, 그리고 푸아송 비를 입력하였다.

끼움판이 연결되는 부위의 반대편은 자유도를 완전히 구속하는 조건(encastre)을 부여하였고 끼움판과 캔틸레버의 접촉이 발생할 수 있는 표면에는 접촉(contact)조건을 적용하였다.

초기에 작용점에 인가되는 변위는 3 mm이며 변위

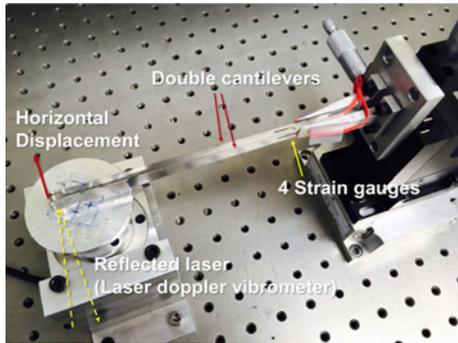


Fig. 5. Image of tribometer consisted of double cantilevers and connecting plate.

조건이 제거되는 순간 캔틸레버는 탄성회복을 위해 좌우로 진동하게 되는데, 이 때 변위의 작용점이 움직이는 양을 기록함으로써 캔틸레버의 진폭을 확인할 수 있었다.

2.2. 마찰시험기의 설계에 따른 특성의 실험적 규명

유한요소해석에서 수행한 시뮬레이션의 절차와 유사한 실험을 수행하여 수치해석의 타당성을 확인하고자 하였다. Fig. 5는 두 개의 캔틸레버와 연결판으로 구성되어 실제로 제작된 마찰시험기의 사진을 나타내고 있다. 사진에는 나타나 있지 않으나 실제 제작된 마찰시험기는 단일 캔틸레버를 사용하는 것과 두 개의 캔틸레버를 연결판으로 체결한 것, 두 가지이다. 수치해석의 조건과 마찬가지로 두 종류의 마찰시험기의 끝단을 수평방향으로 약 3 mm 만큼 이동시킨 뒤 물리적 구속을 제거하여 캔틸레버가 탄성복원하는 과정에서 발생하는 진동을 레이저 도플러 속도계(LDV: laser Doppler velocimeter)를 이용하여 측정함으로써 진동 감쇠 특성을 상호 비교하였다.

이러한 시험은 사전에 정의된 동일한 변위조건에서 얼마나 빠르게 진동이 감쇠되는지 확인하기에는 좋으나 실제 마찰시험상황에서 서로 다른 마찰시험기가 어떻게 거동하는지에 대한 정확한 정보를 제공해 주지는 못한다. 따라서 직접 제작된 두 종류의 마찰시험기를 이용하여 임의의 핀온디스크(pin-on-disk) 타입의 마찰시험을 수행하고 이 과정에서 스트레인 게이지를 통하여 획득된 값 또한 비교하였다. 볼-평판 시편과 접촉할 상대 시편으로는 표면거칠기가 매우 낮고 균일한 표면을 갖는 하드디스크 플래터를 선정하였다. 마찰시험 과정에서 수직하중으로 작용하는 볼-평판 시편의 무게는

50 mg 이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 수치해석을 통한 진동특성 비교

세가지 다른 설계를 갖는 마찰시험기의 진동특성을 수치해석을 이용하여 확인하였다. Fig. 4의 작용점에 변위를 인가한 뒤 구속조건을 제거하여 캔틸레버가 진동하도록 만들어 작용점의 위치를 매 시점에 기록한 결과, Fig. 6와 같은 그래프로 나타났다. 세 모델 모두 초기 변위 값은 시뮬레이션에서 설정한 대로 3 mm이며 시간이 흐름에 따라 점차 진동이 감쇠되어 변위가 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

정량평가를 위하여 진폭이 초기 변위의 10% 이하

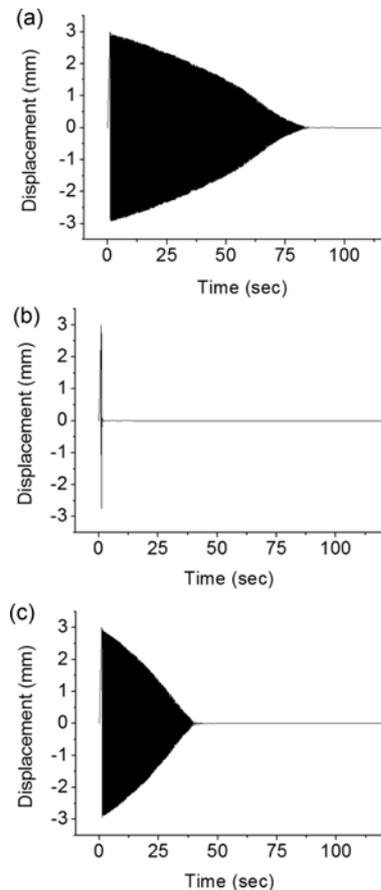


Fig. 6. Vibration of the tribometer with (a) single cantilever, (b) double cantilever interlocked with connecting plate, and (c) double cantilevers bonded with flat plate measured through numerical analysis.

(0.3 mm)로 줄어드는 시간을 측정 한 결과, 단일 캔틸레버 모델은 73초, 이중 캔틸레버와 연결판을 기계적으로 체결한 모델은 1.2 초, 이중 캔틸레버를 연결판과 접합한 모델은 36.9초의 시간이 소요되었다. 이중 캔틸레버와 연결판을 기계적으로 체결한 모델이 가장 빠른 진동감쇠 특성을 나타낸 결과는 마찰시험기의 설계 과정에서 예측했던 것처럼 체결부위에서의 상호작용(접촉, 마찰 등)이 진동감쇠에 매우 효율적이었기 때문으로 추정된다. 그에 비하여 단일 캔틸레버나 이중 캔틸레버를 연결판과 접합시킨 모델은 진동을 감쇠할 요소가 존재하지 않아 오랜 감쇠시간을 요구한 것으로 판단된다.

3-2. LDV를 이용한 진동감쇠 특성 실험결과

수치해석과 유사하게 일정 변위를 초기조건으로 부여하였을 때 나타나는 진동특성을 LDV를 이용하여 측정하였다. 실제로 제작한 두 종류의 마찰시험기에 약 3 mm만큼의 초기변위를 가하였을 때의 진동을 측정 한 결과 Fig. 7과 같이 나타났다. 수치해석 결과에 대한 분석과 마찬가지로 변위가 10% 이하로 줄어드는 감쇠시간을 비교하면 단일 캔틸레버 설계의 마찰시험기는 26초, 이중 캔틸레버와 연결판의 기계적 체결을 이용한 마찰시험기는 3.6 초의 시간이 소요되었다. 수치해석결과와 실험의 결과값에 다소 차이가 있음을 알 수 있는데, 단일 캔틸레버의 경우 실험에서 수치해석 결과보다 짧은 감쇠시간을 나타내고 있으며 이중 캔틸레버는 수치해석 쪽의 감쇠시간이 실험보다 짧은 것으로 나타나고 있다.

단일 캔틸레버의 경우, 수치해석에서 공기에 의한 진동감쇠효과를 고려하지 않았기 때문에 실제보다 다소 긴 감쇠시간이 나타난 것으로 보인다. 이중 캔틸레버의 경우에는 실제 제작된 캔틸레버와 연결판의 흡이

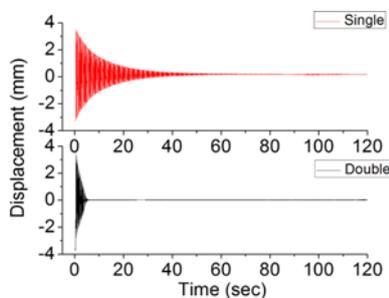


Fig. 7. Vibration of the tribometer with single and double cantilevers obtained by LDV.

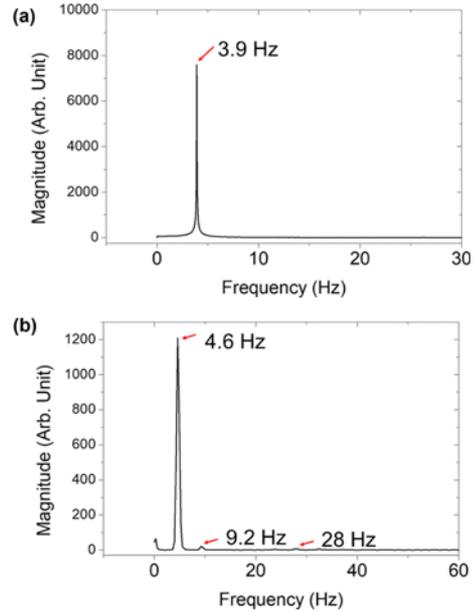


Fig. 8. FFT analysis result of the tribometers with (a) single cantilever and (b) double cantilever and connecting plate.

가공오차 및 공차에 의하여 체결 시에도 일정 수준의 간격을 갖는 것에 비하여, 수치해석 모델은 정확하게 들어맞는 치수를 가지고 있어 기계적 상호작용의 수준이 실험에 비하여 크게 나타났을 것으로 추정된다. 따라서, 수치해석 모델의 경우 실험에서의 결과보다 빠르게 진동감쇠가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 8은 LDV로부터 획득된 Fig. 7의 데이터를 고속 푸리에 변환을 통하여 주파수 도메인으로 표현한 결과이다. Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯, 단일 캔틸레버를 이용한 마찰시험기의 경우 유일하게 3.9 Hz에서 신호가 나타났으나 이중 캔틸레버와 연결판을 이용한 마찰시험기의 경우에는 Fig. 8(b)에 나타나는 것과 같이 다수의 피크 값들이 존재함을 알 수 있다. 즉, 단일 캔틸레버의 경우에는 진동감쇠와 관련된 요소가 존재하지 않아 순수하게 캔틸레버만의 고유진동에 의한 결과가 측정된 것으로 보인다. 그에 비하여 이중 캔틸레버의 경우에는 연결판과의 상호작용에 의한 영향이 상대적으로 높은 주파수 대(9.2, 28 Hz)에서 기록된 것으로 판단된다.

3-2. 마찰시험을 통한 마찰시험기의 신뢰성 평가

앞서 확인한 마찰시험기의 진동특성 규명은 일정한 변위를 순간적으로 가한 뒤, 구속조건을 제거하는 인

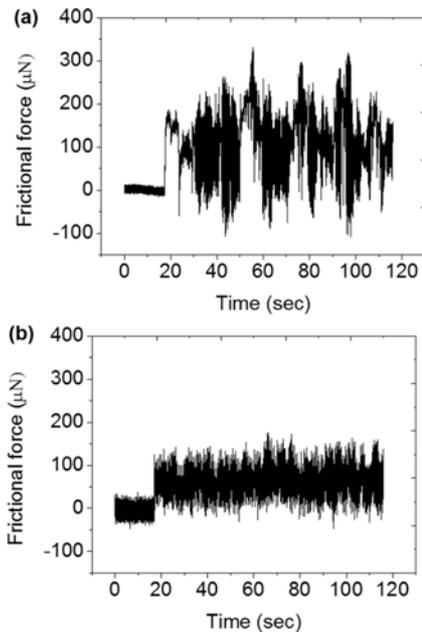


Fig. 9. Frictional force obtained using the tribometer with (a) single cantilever and (b) double cantilevers and connecting plate.

위적 상황에서 이루어졌다. 그러나 마찰시험기가 실제 활용되는 상황은 계속해서 마찰력이 변화하는 조건임을 고려할 필요가 있으며 그에 따라 마찰시험을 수행한 결과를 분석하였다.

Fig. 9는 두 종류의 마찰시험기를 이용하여 하드디스크 플래터에 대해 마찰시험을 수행한 결과 획득된 마찰력을 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 단일 캔틸레버를 이용한 결과이며, 마찰신호의 심각한 진동이 나타남을 알 수 있다. 이는 지나치게 낮은 캔틸레버의 강성에 의하여 시편의 접촉면에서 스틱슬립(stick-slip) 현상이 발생하였기 때문으로 보인다. 실제 시험 과정에서도 캔틸레버가 불규칙하게 과도한 변형을 하였다가 순간적으로 변형이 해소되면서 진동을 거듭하는 현상이 발견된 바 있다. 더불어 단일 캔틸레버 설계의 경우 진동을 빠르게 감쇠시켜줄 수 있는 요소가 없어 스틱슬립 현상이 발생했을 때 정상상태로 회복이 더디게 일어나는 것도 또 하나의 원인으로 추정할 수 있다. 그에 비하여 이중 캔틸레버를 사용한 경우에는 Fig. 9(b)에서 확인할 수 있듯, 마찰력이 비교적 일관되게 유지되고 있는데, 이는 두 개의 캔틸레버를 사용함으로써 강성이 증가하여 상대적으로 스틱슬립 현상이 적게 나타나는 동시에, 연결판과 캔틸레버 사이의 기계적 상호작용

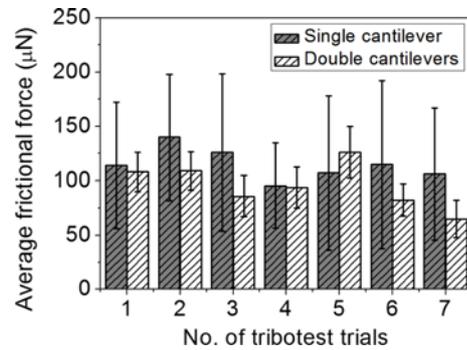


Fig. 10. Summary of frictional force obtained using the tribometers with single and double cantilevers.

용에 의한 진동감쇠 효과가 단일 캔틸레버에 비하여 두드러지게 나타난 결과로 판단된다.

마찰시험기를 통해 획득되는 마찰력이 다수의 시험에서 일관되게 나타나는지 검증하기 위하여 총 7회의 마찰시험을 수행하고 그 결과를 분석한 결과 Fig. 10과 같이 나타났다. 해당 그림은 각각의 시험으로부터 획득된 마찰력의 평균값과 표준편차를 나열하고 있다.

Fig. 9에서 명확하게 드러난 것처럼, 단일 캔틸레버를 사용한 경우에는 마찰력의 편차가 이중 캔틸레버를 사용한 경우에 비하여 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 토대로 고려할 때, 안정적인 마찰력 취득을 위해서는 진동을 빠르게 감쇠시켜줄 수 있는 이중 캔틸레버 구조가 보다 유리함을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에 나타난 각각의 시험을 통해 획득된 평균값들에 대해서 다시 평균을 취하면, 단일 캔틸레버를 통해 획득된 마찰력은 115 μN , 이중 캔틸레버를 이용하여 획득한 마찰력은 96 μN 으로 20% 가량의 차이가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 단일 캔틸레버 마찰시험기가 불규칙적으로 발생하는 스틱슬립 거동을 제어하지 못하여 나타나는 현상으로 판단된다. Kim, Muser 등의 연구에서 스틱슬립 거동을 제거함으로써 마찰력이 저감된다는 사실이 알려져 있는데, 본 연구에서 나타난 마찰력의 차이도 이러한 스틱슬립의 유무에 의한 결과로 판단된다[13,14].

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 뉴턴 수준의 마찰력을 측정하기 위한 정밀 마찰시험기의 설계를 제안하고, 성능

개선을 위한 방안과 진동특성에 대한 수치해석 및 실험을 수행하였다. 그 결과, 저하중 조건에서 마찰측정의 신뢰도를 저해하는 요인으로 캔틸레버의 진동 및 스틱슬립 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방법으로 이중 캔틸레버를 기계적으로 체결하는 연결판 구조를 제안하였으며, 수치해석 및 실험을 통하여 해당 설계가 진동감쇠에 효과적임을 검증하였다. 적절한 형상의 마찰시험기를 설계함으로써 수십~수백 μN 수준의 매우 작은 마찰력을 간단하게 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 토대로 향후 정밀 마찰시험기의 발달에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

이 성과는 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A1A01053416).

References

- [1] Kim, H.-J., Kim, D.-E., "Nano-scale friction: A review", *Int. J. Precis. Eng. Man.*, Vol. 10, pp. 141-151, 2009.
- [2] Malek, C. K., Saile, V., "Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and -systems: a review", *Microelectron. J.*, Vol. 35, pp. 131-143, 2004.
- [3] Shikida, M., Masuda, T., Uchikawa, D., Sato, K., "Surface roughness of single-crystal silicon etched by TMAH solution", *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 90, pp. 223-231, 2001.
- [4] Patton, S. T., Zabinski, J. S., "Failure mechanisms of a MEMS actuator in very high vacuum", *Tribol. Int.*, Vol. 35, pp. 373379, 2002.
- [5] Bhushan, B., *Principles and Applications of Tribology*, Chap. 12, pp. 812, John Wiley & Sons, Inc., 1999. (ISBN : 0471594075)
- [6] Czichos, H., Becker, S., Lexow, J., "Multilaboratory tribotesting: Results from the Versailles Advanced Materials and Standards programme on wear test methods", *Wear*, Vol. 114, pp. 109-130, 1987.
- [7] Khadem, M., Penkov, O. V., Pukha, V. E., Maleyev, M. V., Kim, D.-E., "Ultra-thin nano-patterned wear-protective diamond-like carbon coatings deposited on glass using a C60 ion beam", *Carbon*, Vol. 80, pp. 534-543, 2014.
- [8] Kim, H.-G., Kim, T.-H., Kim, J., Jang, Y.-J., Kang, Y.-J., Kim, D.-E., "Water Lubrication Characteristics and Effect of Nano Particles based on the Substrate", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 6, pp. 245-250, 2017.
- [9] Sader, J. E., "Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp. 3967, 1999.
- [10] Varenberg, M., Etsion, I., Halperin, G., "An improved wedge calibration method for lateral force in atomic force microscopy", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 74, pp. 3362, 2003.
- [11] Celis, J.-P., Ponthiaux, P., *Testing Tribocorrosion of Passivating Materials Supporting Research and Industrial Innovation: A Handbook*, Maney Publishing, 2011, (ISBN 1907975209).
- [12] Kim, H.-J., Kim, H.-W., *Precise tribometer operated with low load*, Kyungpook National University, KR Patent No. 10-1793593, 2017.
- [13] Kim, H.-J., Kim, D.-E., "Molecular dynamics simulation of atomic-scale frictional behavior of corrugated nano-structured surfaces", *Nanoscale*, Vol. 4, pp. 3937-3944, 2012.
- [14] Muser, M. H., "Nature of Mechanical Instabilities and Their Effect on Kinetic Friction", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, pp. 224301, 2002.