

## 미세마찰실험장치의 개발

### Development of a Precision Friction Tester

김충현 안효석

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터  
136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

#### Abstract

It is an object of this research to develop a fine friction tester capable of analyzing a friction characteristics of a small size specimens in a load range of 0.03 ~ 2.0 N.

According to the test results using the developed precision friction tester, it is expected to get the experimental data with fine resolution and high reliability.

#### 1. 서론

최근 기계 및 전기전자 기술의 급진적인 발전과 더불어 각종 첨단기기들이 소형, 경량화 되는 추세에 있으며 이들 기기들을 구성하는 부품들에 대한 설계, 제작에 필요한 마찰특성에 관한 연구<sup>(1~12)</sup>의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 초소형부품들의 마찰특성연구를 위해서는 1N 이하의 저하중과 1mm 이내의 미끄럼거리를 구현할 수 있는 정밀실험장치의 개발이 요구된다. 그러나, 기존의 왕복동형 마찰실험장치는 하중 10N 이상, 최소행정이 10mm 이상인 실험조건에서 작동되는 것이 대부분이다.

본 연구에서는 권선(winding)에 인가되는 전류에 의하여 자력(magnetic force)을 발생하는 전자석(electromagnet)을 이용하여 한 쌍의 시편에 하중을 부여하고 스텝모터(step motor)를 이용한 왕복운동부를 두어 시편 사이에 왕복운동을 발생시키는 왕복동형 마찰실험장치(reciprocating sliding friction tester) 개발연구를 통하여 하중과 왕복행정의 분해능이 각각 0.01N과 1 $\mu$ m 이하로서 고정밀 제어가 가능한 실험장치를 개발하고자 하였다.

#### 2. 미세마찰실험장치

##### 2.1 전체실험장치의 구성

미세마찰실험에서는 작용하중의 크기가 매우 작아서 주변환경의 영향을 받기 쉽기 때문에 주어진 실험조건 이외에 마찰실험에 영향을 주는 다른 요소들을 배제하기 위한 실험환경이 요구된다. 따라서, 실험환경을 일정하게 유지할 수 있도록 항온항습 및 방진설비를 갖춘 투명한 아크릴상자를 제작하고 그 내부에 미세마찰실험장치를 설치함으로써 실험진행과 관찰이 용이하도록 구성하였다.

Fig. 1은 본 연구를 통하여 설계, 제작한 미세마찰실험장치 전체의 구성도이다.

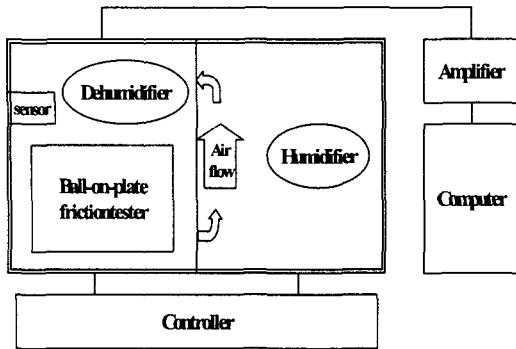


Fig. 1 The schematic diagram of experimental set-up

미세마찰실험장치가 들어있는 아크릴상자는 밀폐되어 있어 외부환경과 차단되어 있으며 외부에서 발생하는 진동의 영향이 실험장치에 미치지 않도록 아크릴상자 밑에 방진용 댐퍼를 설치하였다.

아크릴상자는 두 부분으로 나누어져 있으며 한 곳에는 마찰실험장치, 제습장치, 온습도 센서가, 다른 곳에는 가습장치가 각각 설치되어 있다. 상자를 두 부분으로 나눔으로써 습도를 올리는 과정에서 가습장치로부터 발생한 물 입자가 공기와 충분히 섞인 후 Fan을 통하여 실험장치가 있는 부분으로 유입되어 실험장치와 시편에 물방울이 맺히는 것을 방지할 수 있게 하였다. 또한, Fan을 통과하는 유로에는 개폐식 뚜껑을 설치하고 습도를 낮출 경우에는 이 뚜껑을 닫아 두 부분이 서로 차단되도록 설계하였다.

미세마찰실험장치로부터 측정된 데이터 신호는 외부로 출력되어 증폭기(amplifier)를 통해서 증폭된 후에 A/D(analog to digital) 보드를 통해서 컴퓨터에 입력되며, 실험조건과 내부환경은 제어기(controller)를 통하여 조절할 수 있도록 제작되었다.

## 2.2 미세마찰실험장치의 구조

본 연구를 통하여 개발된 미세마찰실험장치는 볼시편(ball specimen)과 이와 접촉하는 평판시편(plate specimen) 사이에 왕복 미끄럼마찰을 발생시켜 시편 재질간의 마찰특성을 살펴볼 수 있는 왕복동형 마찰실험장치로서 고정밀 제어가 가능하므로 초소형 기계부품의 마찰특성 연구에 활용할 수 있다.

Fig. 2는 개발된 미세마찰실험장치의 전체 구성도이며 실험장치는 시편사이의 상대변위를 발생시키는 구동부, 접촉부에 하중을 가해주는 부하장치, 그리고 마찰특성 해석을 위하여 실험 자료를 취득하는 계측부로 나뉜다.

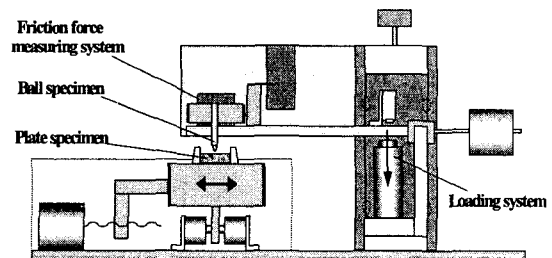


Fig. 2 The schematic diagram of friction tester

### 2.2.1 구동부

평판시편이 고정되어 있는 부분(시편지지대)은 스텝모터에 의해 구동되며 미소 스텝간격으로 움직이게 함으로써 변위조절의 정밀도를 향상시켰다. 시편지지대의 위치는 유도식 변위센서(inductive displacement sensor)를 이용하여 계측하고 왕복운동 구간의 한계 내에서 왕복운동이 이루어지도록 움직임을 제한한다.

### 2.2.2 부하장치

접촉부에 하중을 가하는 기다란 평판은 Fig. 3에서 보는 것처럼 오른 쪽 끝에 걸린 평형추

에 의하여 평형상태를 유지한다. 실험을 위하여 전자석에 전류를 공급하면 전자석에 의하여 발생하는 자력에 비례하여 평판이 휘어지면서 접촉부를 눌러 줌으로써 하중이 가해지게 된다. 이 때 유도식 변위측정용 헤드와 LVDT (linear variable differential transformer)로 이루어진 폐쇄형 제어시스템을 이용하여 평판의 휨량을 측정함으로써 가해지는 하중의 크기를 알 수 있으며 동시에 작용하중값이 일정하게 유지되도록 제어한다.

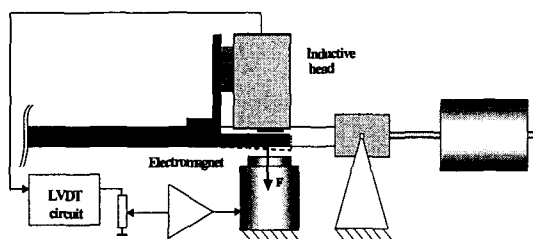


Fig. 3 The schematic diagram of loading system

### 2.2.3 마찰력 측정부

하중이 가해진 상태에서 평판시편이 왕복운동을 하게 되면 마찰력이 발생하고 이 마찰력은 불시편 장착부(stylus head)로 전달된다. 이 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 불시편 장착부 강판(permalloy plate)의 순간 변위를 유도식 변위센서를 이용하여 측정하면 마찰력을 계산할 수 있다.

즉, 불시편 장착부의 스프링상수를  $k$ , 강판의 변위를  $x$ 라고 할 때 마찰력은  $F = kx$ 라는 관계식으로 표현할 수 있다.

유도식 변위센서는 LVDT 회로에 연결되어 마찰력에 상응하는 아날로그 신호를 출력하게 되고 이 신호를 A/D 변환장치를 통해 컴퓨터로 처리하면 마찰력의 변화를 실험이 진행되는 동안 관찰할 수 있다.

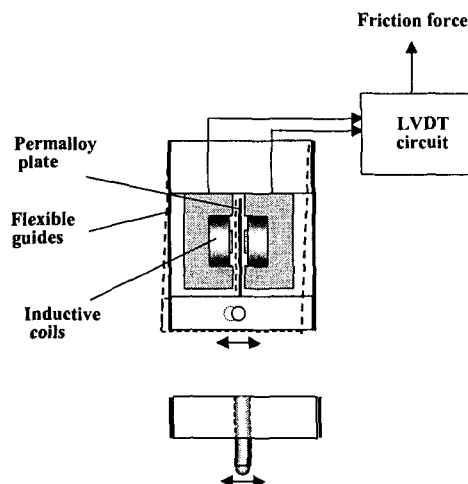


Fig. 4 The schematic diagram of measuring system for friction force

개발된 미세마찰실험장치의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 The specifications of friction tester

Load	0.03 ~ 2.0 N
Specimen dimension	Ball : $\varnothing 3$ mm Plate : 12 x 12 mm
Stroke length	1.2 ~ 7.5 mm
Sliding frequency	Max. 3 Hz
Sliding speed	3.5 ~ 10.3 mm/s
Resolution	
Load	0.1 $\mu$ m
Stroke	0.005 N

## 3. 실험

### 3.1 기본성능실험

Fig. 5는 개발된 미세마찰실험장치의 부하특성을 보인 것이며 제어장치의 하중입력치(load

number)를 변화시키면서 시편에 가해지는 힘을 측정할 것이다. 그래프에 나타낸 바와 같이 하중은 0.03 ~ 2.0N 범위에서 연속적으로 조절이 가능하며 하중조절 분해능은 0.005N이다.

Fig. 6은 미세마찰실험장치의 스트로크값(stroke number)와 왕복주기값(frequency number)를 조절해 가면서 살펴본 평판시편 지지대의 왕복운동 주기를 나타낸 것으로서 사용하고자 하는 임의의 왕복주기를 얻을 수 있는 용이한 조절특성을 보여주고 있다.

### 3.2 실제 실험결과 예

Fig. 7은 DLC (Diamond Like Carbon)를 코팅한 실리콘웨이퍼 시편에 대하여 상대습도를 변화시키면서 마찰 실험한 결과이다. 실험조건은 하중 1.8N, 왕복행정거리는 3mm, 미끄럼 속도는 4.44mm/s이고 상대습도는 처음 2,000회까지는 50%로 유지하다가 2,000회부터 제습장치를 가동시켜 습도를 낮추었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 전자석을 이용함으로써 작용하중을 0.03 ~ 2.0N 범위에서 조절할 수 있고 정밀위치제어가 가능한 스텝모터제어회로를 활용하여 왕복운동을 발생시키는 구동부를 가지며 미끄럼 속도 3.5 ~ 10.3 mm/sec 범위에서 실시간으로 마찰특성을 분석할 수 있는 왕복동형 미세마찰실험장치를 개발하였다.

개발된 미세마찰실험장치를 이용할 경우 미끄럼거리를 미세하게 조절할 수 있고, 미소시스템에 걸리는 저하중 범위의 작용하중을 실현할 수 있으며, 작용하중의 크기와 왕복주기의 연속적 제어가 가능하고, 장시간 구동이 가능하여 신뢰도가 우수한 마찰실험장치임이 확인되었으므로 미소기계시스템의 특성분석연구에 적극 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

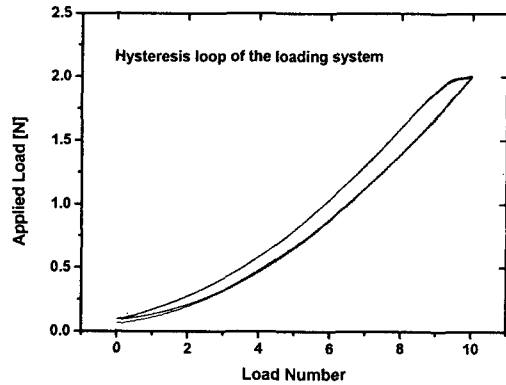


Fig. 5 Load characteristics of the tester

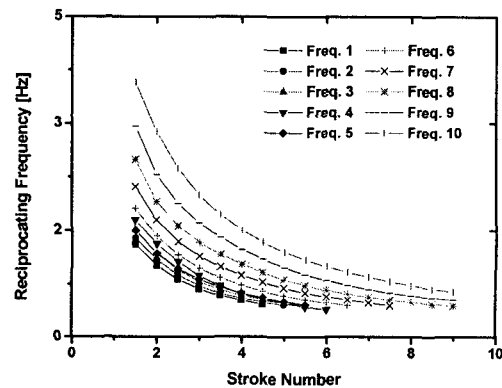


Fig. 6 Reciprocating frequencies of the tester

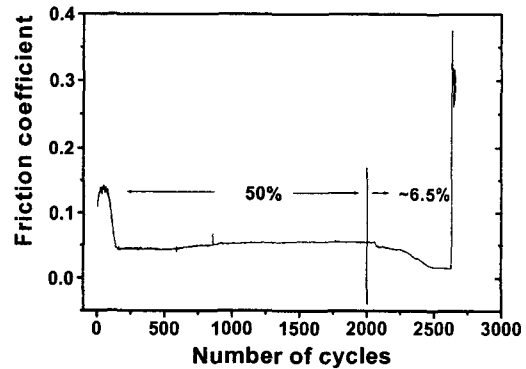


Fig. 7 The friction coefficient of DLC coated silicon wafer as a function of relative humidity

## 후기

본 연구는 국가지정연구실사업에 의하여 지원되었으며 개발된 미세마찰실험장치는 대한민국, 일본, 미국<sup>(13)</sup>에 각각 특허가 출원되어 현재, 심사가 진행되고 있다.

## 참고문헌

- (1) Bharat Bhushan, *Modern Tribology Handbook*, CRC Press, 2000.
- (2) Donald L. Smith, *Thin-Film Deposition*, McGraw-Hill Press, 1997.
- (3) Bharat Bhushan, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, CRC Press, 1999.
- (4) H. Ronkainen, S. Varjus, J. Koskinen, K. Holmberg, "Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings", *Wear* 249, pp. 260-266, 2001.
- (5) Qi Jun, Luo Jianbin, Wen Shizhu, Wang Jing, Li Wenzhi, "Mechanical and tribological properties of non-hydrogenated DLC films synthesized by IBAD", *Surface and Coatings Technology* 128-129, pp. 324-328, 2000.
- (6) E. Liu, B. Blanpain, X. Shi, J.-P. Celis, H.-S. Tan, B.-K. Tay, L.-K. Cheah, J.R. Roos, "Tribological behavior of different diamond-like carbon materials", *Surface and Coatings Technology* 106, pp. 72-80, 1998.
- (7) A. Erdemir, I.B. Nilufer, O.L. Eryilmaz, M. Beschliesser, G.R. Fenske, "Friction and wear performance of diamond-like carbon films grown in various source gas plasmas", *Surface and Coatings Technology* 120-121, pp. 589-593, 1999.
- (8) Da-Yang Wang, Ko-Wei Weng, Chi-Lung Chang, Xien-Jien Guo, "Tribological performance of metal doped diamond-like carbon films deposited by cathodic arc evaporation", *Diamond and Related Materials* 9, pp. 831-837, 2000.
- (9) W.-J. Wu, T.-M. Pai, M.-H. Hon, "Wear behavior of silicon-containing diamond-like carbon coatings", *Diamond and Related Materials* 7, pp. 1478-1484, 1998.
- (10) R. Gilmore, R. Hauert, "Comparative study of the tribological moisture sensitivity of Si-free and Si-containing diamond-like carbon films", *Surface and Coatings Technology* 133-134, pp. 437-442, 2000.
- (11) Jiaren Jiang, R.D. Arnell, "The effect of substrate surface roughness on the wear of DLC coatings", *Wear* 239, pp. 1-9, 2000.
- (12) H. Liu, A. Tanaka, K. Umeda, "The tribological characteristics of diamond-like carbon films at elevated temperatures", *Thin Solid Films* 346, 162-168, 1999.
- (13) H.-S. Ahn, C. H. Kim et al., *Fine Friction and Testing Apparatus*, US Patent pending, 09/853763, 2001.