

프레팅 조건 하에서 스틱-슬립 현상이 마찰력에 미치는 영향

정성훈 · 용석주 · 이영제*

성균관대학교 기계공학부

Influence of Stick-Slip Behavior on the Friction Force under Fretting Conditions

Sung-Hoon Jeong, Suk-Ju Yong and Young-Ze Lee[†]

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,
300 Chunchun-Dong, Jangan-Gu, Suwon 44-746, Korea

Abstract – Friction and wear characteristics between two steel surfaces under fretting condition are investigated experimentally. The fretting damage caused by low-amplitude oscillatory sliding can be classified into three regimes of gross-slip, mixed-slip and partial-slip due to stick-slip phenomenon. One of the most important characteristics of fretting wear is the transition from gross-slip to mixed-slip. This study was focused on getting the degree of stick-slip out of the friction transition under fretting condition. Fretting wear is divided into three conditions of gross-slip/mixed-slip/partial-slip. The criteria for the division are friction and displacement amplitude, wear scar morphology and dissipated energy. In this test, friction force and displacement were measured for detecting the transition from mixed-slip to gross-slip and qualitatively predicting the degree of the wear.

Key words – fretting wear, stick-slip, friction, wear transition, ball on flat.

1. 서 론

프레팅은 접촉하고 있는 두 물체 사이에 미세진동이 발생할 때 작은 진폭의 상대운동으로 인한 파손현상을 말한다. 프레팅 마멸은 프레팅 작용으로 인해 접촉 표면으로부터 재료가 제거되는 현상이다[1]. 프레팅 마멸은 항공기의 리벳 결합부, 회로 기관의 접촉부, 증기발생기의 세관 등 다양한 부분에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 프레팅 시에 발생하는 스틱-슬립현상은 프레팅 마멸의 특성에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 프레팅 마멸시 마찰력의 변화를 통하여 스틱-슬립의 정도를 살펴보고 이를 이용하여 마멸 특성을 예측하고자 한다. 프레팅 마멸은 스틱-슬립의 정도에 따라 Gross-slip/Mixed-slip/Partial-slip의 세 영역으로 구분된다[2]. Gross-slip영역은 접촉된 전영역에서 미끄럼이 발생하여

마멸량이 세 영역중 가장 큰 영역이다. Mixed-slip영역은 스틱부와 슬립부가 공존하지만 시간이 경과함에 따라 스틱부가 점차 사라지는 영역이며, 프레팅 피로 현상이 주로 발생하는 영역이다. Partial-slip영역은 환형의 부분 미끄럼만 발생하여 마멸량이 거의 없는 부분이다. 이러한 영역 구분 기준으로는 마멸흔의 모양, 소산에너지 등 여러 가지가 있으나, 시스템 의존적이거나 관련 변수를 결정하기 어려운 문제들을 가지고 있다[3-4]. 본 연구에서는 스틱-슬립 영역 구분 기준으로 마찰력과 상대변위를 각각 나눠서 살펴보고, 이에 따른 Gross-slip에서 Mixed-slip으로의 천이과정을 알아내고자 한다. 이는 마찰력의 변화특성을 통하여 마멸량을 정성적으로 판단할 수 있는 기준을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 Gross-slip에서 Mixed-slip으로의 천이 시 마찰력의 변화를 통한 스틱-슬립의 정도를 살펴보고 마멸 특성을 예측하는 것이다.

*주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

2. 실험장치 및 방법

2-1. 프레팅 시험기 및 시편

프레팅 시험기의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 프레팅 현상을 일으키기 위해 캠 방식을 사용하여 가

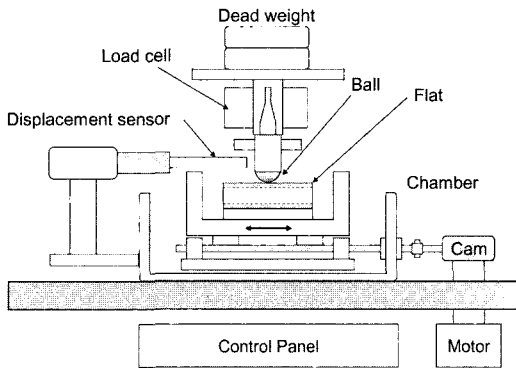


Fig. 1. Schematic diagram of the fretting tester.

진하였으며 일정한 가진을 위해 서보모터를 사용하였다. 하중은 지중방식을 사용하였으며 마찰력의 측정에는 100 N 용량의 로드셀을 사용하였다. 상대변위의 측정에는 커패시턴스형 비접촉 변위센서를 사용하였다. 데이터는 A/D변환기를 통해서 수집하였다. 시험 시편의 형태는 볼-평판의 구성이며, 평판 시편으로는 SM45C, 볼 시편으로는 1/4인치 크롬 합금 강구를 사용하였다. 평판 시편의 조도는 Ra 0.025 μm 이며 강구의 조도는 Ra 0.02 μm 이다.

2-2. 실험방법

실험시 접촉부에 가해지는 수직하중의 범위는 5 N에서 50 N이며, 수평방향으로 300 μm 의 가진진폭을 1 Hz (60 rpm)로 가한다. 평판이 가진되어 움직이며, 볼과 평판 사이의 마찰력의 변화에 따라 상대변위를 발생시키는 형태로 시험기가 구성되어 있다. 즉, 본 실험에서 하중의 변화는 마찰력과 상대변위의 변화를 일으키는

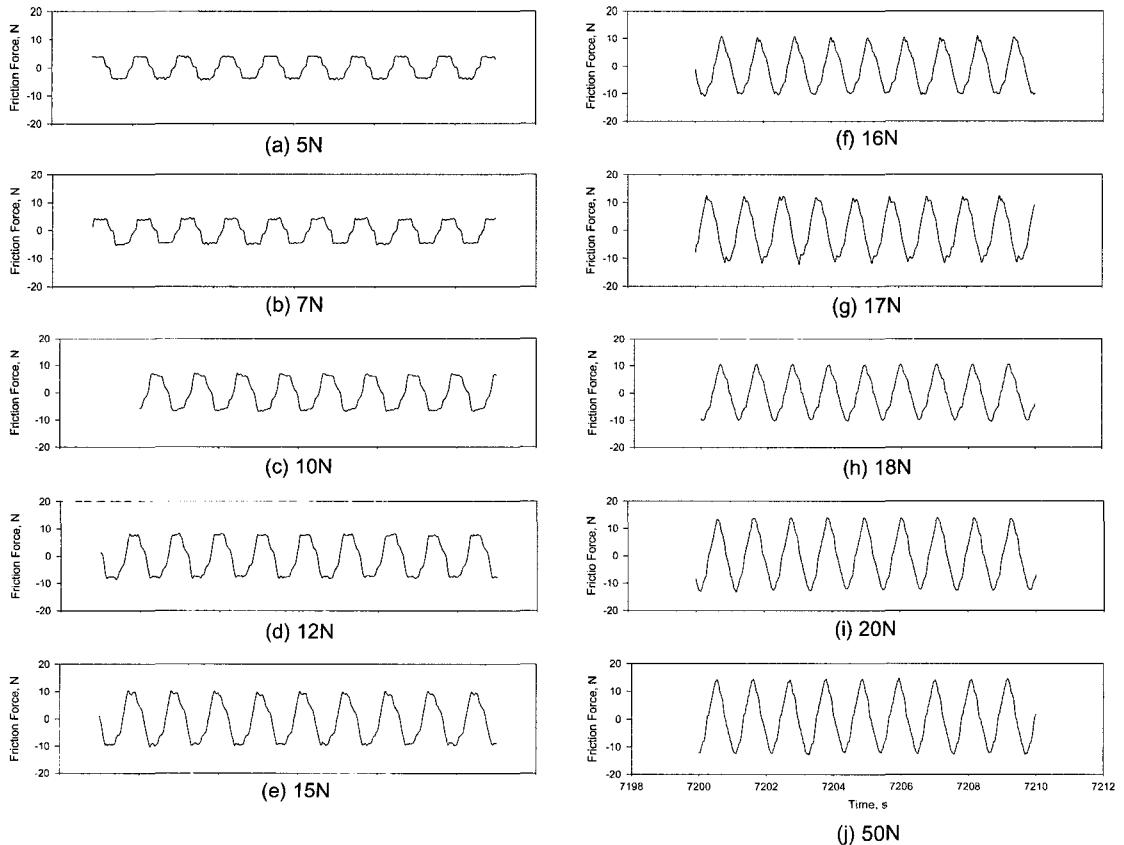


Fig. 2. Friction transitions due to stick-slip after 7200 cycles (1 Hz) under fretting condition.

주요 변수이다. 데이터 획득시 샘플링레이트(sampling rate)는 마찰력과 상대변위 측정시 각각 50 Hz이다. 필터는 10 Hz의 low pass filter를 사용하였다. 측정 시간은 7,200 cycle(2시간)이 될 때까지 측정하였으며, 마멸흔의 관찰은 광학현미경을 통해 실험 후의 표면을 관찰하였다. 실험 후 마멸된 부분에 조도계를 사용하여 마멸폭과 깊이를 측정한 후 마멸부피를 산출하였다.

3. 실험 결과

3-1. 마찰력

Fig. 2는 하중의 증가에 따라 슬립에서 스틱으로 천이해 갈 때의 마찰력의 변화를 나타낸다. 마찰력을 측정할 시기는 7,200 cycles (1 Hz)이 경과한 후에 측정하였다. Gross-slip이 발생하는 경우, 마찰력의 형상은 Fig. 2의 (a) 5 N~(e) 15 N의 마찰력 그래프에서 보이는 것처럼 시간에 따라 마찰력이 일정한 부분이 나타나 있다. 이는 일종의 동마찰(kinetic friction)이라고 볼 수 있으며, 마찰력의 형태에서 평탄한 부분을 갖는다. 따라서 (a)에서 (e)까지는 Gross-slip영역이며 하중이 증가함에 따라 마찰력의 크기는 점차 증가하였고, 평탄부의 폭은 점차 줄어들어 슬립이 감소함을 알 수 있었다.

하중이 더 증가하여 스틱의 경향이 증가함에 따라 일반적인 마찰력 그래프에서 볼 수 있는 정마찰에서 동마찰로 천이하는 형상이 나타남을 알 수 있었다. 이는 Fig. 2의 (f) 16 N, (g) 17 N과 미약하지만 (h) 18 N의 경우에서 확인할 수 있었다. 즉, 마찰력의 모양에서 상승(∧)하다가 평탄부(—)를 나타내는 형태를 확인할 수 있었다.

스틱이 확실히 발생할 경우, 마찰력 형상은 Fig. 2의 (i) 20 N 이상의 하중에서 보이는 것처럼 삼각형 모양을 나타내었다. 이는 정마찰 현상을 나타내는 것으로 시간에 따른 마찰력의 변화는 일반적으로 정마찰 시에는 마찰력이 일정한 기울기를 가지고 변화하는 현상을 나타낸다는 것에서 알 수 있었다.

따라서, 일정 사이클후의 마찰력의 형상을 가지고 스틱-슬립의 정도를 예측할 수 있으며, 그에 따른 마멸흔의 모양도 정성적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 다음의 광학현미경을 통한 마멸흔의 형상 분석에서도 증명될 것이며, 마찰력의 모양과 스틱-슬립의 정도, 마멸량은 큰 연관성이 있음을 알 수 있다.

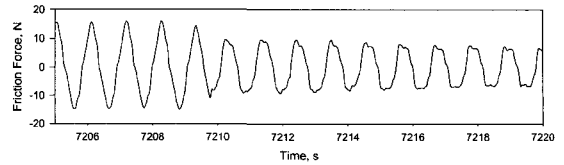


Fig. 3. Friction transition from mixed-slip to gross-slip after oil injection at 7,200 cycles.

3-2. 마찰력 천이과정의 확인

슬립과 스틱에 따른 마찰력의 천이 과정을 확인하기 위하여, 25 N의 하중, 즉 스틱부가 확연히 나타나는 하중에서 7,200 cycles후에 광유계 윤활유(WD40)를 분사한다. 이에 대한 결과가 Fig. 3에 나타나 있으며 이를 통해 스틱이 발생할 때의 마찰력 신호로부터 윤활유의 효과로 인한 슬립이 발생할 때의 마찰력 신호로의 천이과정을 확인할 수 있었다. 그래프에서 마찰력의 형상이 삼각형 모양에서 평탄부가 존재하는 모양으로 변화해 갔다. 윤활유의 분사는 7,200 cycles에서 되었지만, 접촉부로 윤활유의 접근시간이 필요했기 때문에 반응은 10 여초정도 늦게 일어난 것으로 판단된다. Gross-slip에서 Mixed-slip으로 천이해 가는 마찰력

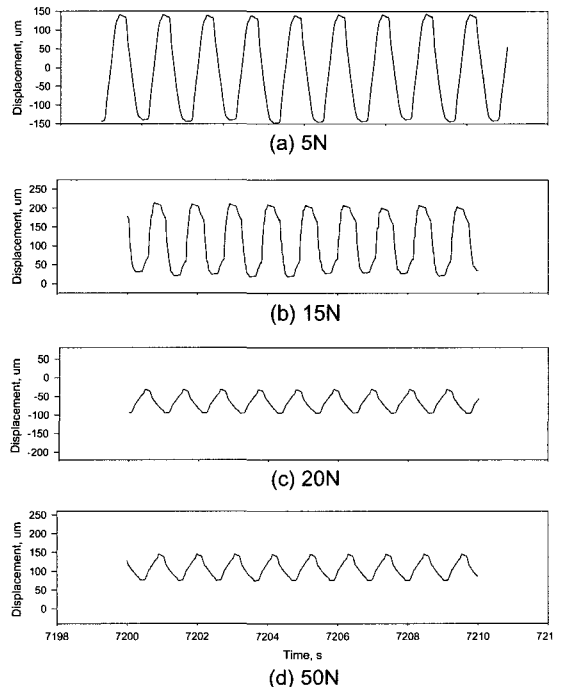


Fig. 4. Displacement transitions due to stick-slip after 7200 cycles (1 Hz) under fretting condition.

형상의 특성을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

3-3. 상대변위

Fig. 4는 하중 증가에 따른 상대변위 변화 그래프를 나타낸다. 이 그래프들에서 유의할 점은 측정장비의 특성상 각 그래프에서 세로축의 수치는 다르더라도 최대-최소값의 차이는 항상 300 μm 로 일정하다는 것이다. (a) 5 N의 상대적으로 낮은 하중의 경우에 상대변위의 크기는 거의 가진 진폭의 크기인 300 μm 정도만큼 나타났으며, 하중이 증가함에 따라 상대변위의 크기는 점차 줄어들었다. 상대변위는 (b) 15 N의 하중까지는 서서히 감소하다가 (c) 20 N에서 급격히 감소하여 80 μm 정도를 나타냈다. 20 N 이상의 하중에서는 큰 변화 없이 80 μm 정도의 값을 유지하였다.

3-4. 마찰계수

Fig. 5는 하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸다. 5 N의 하중에서는 마찰계수의 값이 0.9까지 이르지만 그 이후부터 20 N전까지 즉, Gross-slip구간까지는 마찰계수값이 대략 0.7정도로 다소 일정하게 나온다. 20 N이후부터 마찰계수 값은 하중이 증가함에

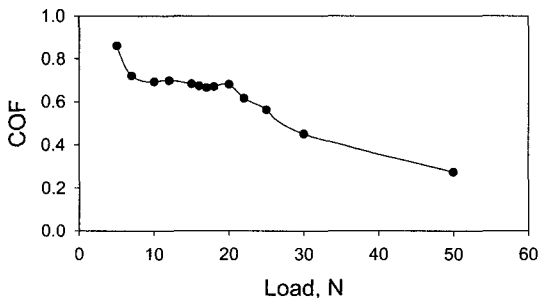


Fig. 5. Friction coefficients by load increase.

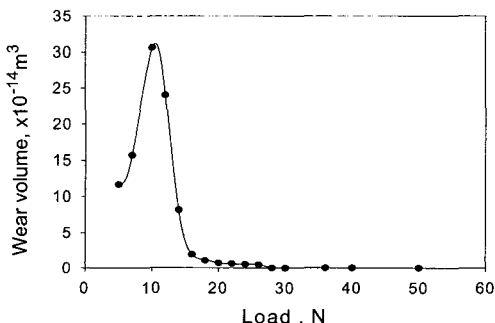


Fig. 6. Wear volume by load increase.

따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 스틱의 발생으로 진폭이 감소함에 따라 로드셀로 전달되는 힘이 크게 줄어들었기 때문이다. 즉, 스틱이 발생함에 따라 수평방향의 가진력이 마찰력을 넘어설 수 없어서 슬립이 크게 줄어들어 마찰계수가 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

3.5. 마멸량

Fig. 6은 하중 증가에 따른 마멸부피를 나타낸다. 20 N 미만의 하중에서는 슬립의 양이 많기 때문에 측정 가능한 정도의 마멸부피를 나타냈지만, 20 N 이상의 하중에서는 스틱이 발생함에 따라 슬립의 양이 급격하게 줄어들어 마멸부피의 양이 거의 없었다. 결론적으로, 프레팅 마멸시 문제가 되는 부분은 슬립이 많은 Gross-slip영역임을 알 수 있었으며, 스틱이 발생하는 영역에서는 마멸량은 큰 문제가 되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.6. 마멸흔의 모양

Fig. 7은 하중 증가에 따른 마멸흔의 광학사진을 나타낸다. Gross-slip영역인 (a) 10 N에서 (d) 18 N까지의 마멸흔에서는 접촉부 전영역에서 미끄럼이 발생하여 연삭마멸이 발생하였음을 알 수 있다. Gross-slip영역에서 마멸흔의 크기는 하중이 증가함에 따라 슬립이 감소하기 때문에 감소한다. (e) 20 N은 마찰력과 상대변위 신호에서 살펴보았듯이 Mixed-slip의 시작부분이라고 볼 수 있고, 광학사진의 경우에도 스틱부가 보이기 시작하는 (f) 22 N의 하중 직전이므로 마멸시간이 짧았다면 충분히 스틱부가 존재했을 것으로 판단되므로 Mixed-slip의 시작이라는 것을 알 수 있었다. 22 N이상의 하중에서는 스틱부가 점점 더 확실하게 보이기 시작해서 마멸흔의 전체 크기에서 스틱부가 차지하는 비율이 점점 커지고 환형의 부분 슬립부의 크기는 점점 줄어들음을 알 수 있다. 또, 스틱구간에서는 하중이 증가함에 따라 접촉 면적의 증가로 마멸흔의 전체 크기는 증가하나 스틱부의 크기도 같이 증가함으로써 마멸량은 확연히 줄어들음을 알 수 있었다. 이는 Fig. 8의 그래프를 통해서 마멸흔의 크기를 비교해 보면 알 수 있다. 그래프에서 보이듯이, 18 N까지의 Gross-slip영역에서는 스틱부가 존재하지 않으며, 20 N은 스틱부가 확실하게 나타나기 바로 전인 Mixed-slip의 시작이고, 22 N이상의 하중부터는 스틱부가 마멸흔에서 상당한 부분을 차지할 정도로 나타나기 시작하여 스틱부의 크

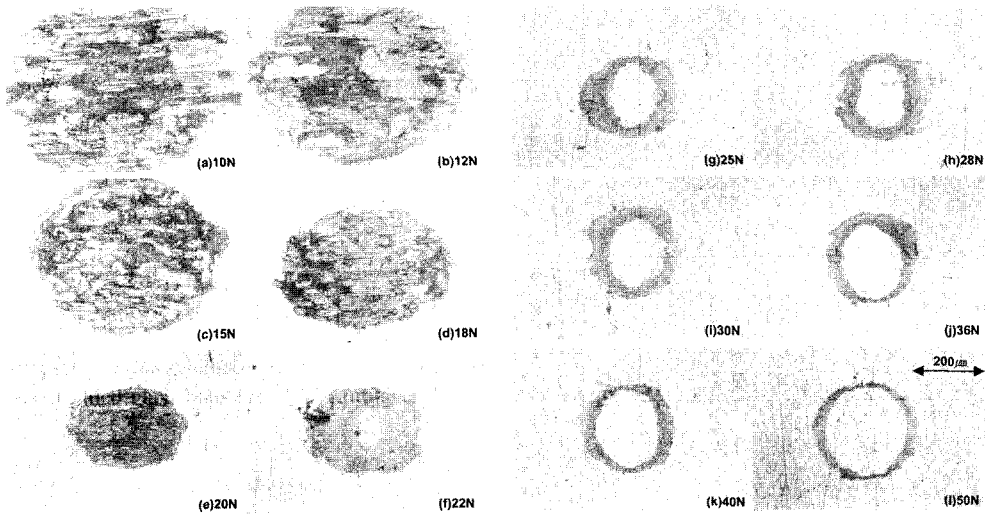


Fig. 7. Optical microscope images of the worn surfaces by load increase.

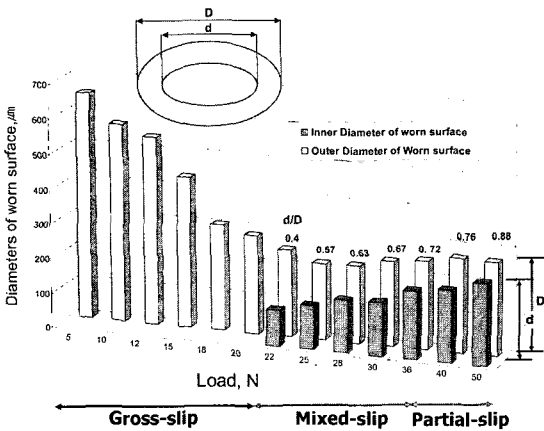


Fig. 8. Ratios between slip part and stick part in wear scar.

기가 하중이 증가함에 따라 계속 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로, 마찰력과 상대변위의 신희분석 결과를 통한 스틱-슬립 영역의 구분과 광화사진으로 판별한 스틱-슬립 영역의 구분은 큰 상관관계를 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

볼-평판의 프레팅 실험에서 하중의 변화에 따른 마찰력과 상대변위의 측정을 통해 Gross-slip에서 Mixed-slip으로의 천이 과정을 확인할 수 있었다.

마찰력 신호는 Gross-slip에서 평탄한 부분을 나타내

며 스틱이 발생하는 Mixed-slip과 Partial-slip에서는 삼각형의 형상을 나타낸다. 상대변위의 크기는 Gross-slip에서 가진진폭의 크기와 비슷하다가 하중이 증가함에 따라 감소한다. Mixed-slip에서는 스틱이 발생함에 따라 급격하게 줄어드는 양상을 나타낸다.

마찰력의 변화를 통해서 스틱-슬립의 정도를 알 수 있고 이를 통해 마멸흔의 형상을 예측 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Bill, R. C., "Review of factors that influence fretting wear, Materials Evaluation under Fretting Conditions," *ASTM STP 780*, pp. 35-46, 1982.
2. Vingsbo, O. and Soderberg, M., "On fretting maps," *WEAR*, Vol. 126, pp 131-147, 1988.
3. Fouvry, S., Kapsa, Ph. and Vincent, L., "Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria," *WEAR*, Vol. 185, pp 35-46, 1995.
4. Fouvry, S., Kapsa, Ph. and Vincent, L., "Quantification of Fretting Damage," *WEAR*, Vol. 200, pp 186-205, 1996.